



KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH  
GESELLSCHAFT MIT BESCHRÄNKTER HAFTUNG  
**Zentralinstitut für Reaktorexperimente**

**Die Entwicklung von Brennstoff- und  
Strukturmaterial-Bestrahlungseinrichtungen  
unter Anwendung des Baukastenprinzips**

von  
F. Schmidt

**Jül - 828 - RX  
Januar 1972**

Als Manuskript gedruckt





# **Berichte der Kernforschungsanlage Jülich – Nr. 828**

**Zentralinstitut für Reaktorexperimente Jül – 828 – RX**

Dok.: Irradiation Facilities - Reactor Materials  
Irradiation Facilities - Design  
Reactor Materials - Irradiation Facilities  
Reactor Fuels - Irradiation Facilities

Im Tausch zu beziehen durch: ZENTRALBIBLIOTHEK der Kernforschungsanlage Jülich GmbH,  
Jülich, Bundesrepublik Deutschland



# **Die Entwicklung von Brennstoff- und Strukturmaterial-Bestrahlungseinrichtungen unter Anwendung des Baukastenprinzips**

von

F. Schmidt



# I\_n\_h\_a\_l\_t

	<u>Seite</u>
1. <u>Einleitung</u>	1
2. <u>Bestrahlungsaufgaben</u>	2
3. <u>Bestrahlungseinrichtungen</u>	3
3.1 <u>Instrumentierungen und Kreisläufe</u>	4
3.2 <u>Bestrahlungseinsätze (Rigs)</u>	5
3.2.1 Einkapselausführung	9
3.2.2 Vierkapselausführung	11
3.2.3 Brennstabausführung	13
3.2.4 Sechskapselausführung	14
3.3 <u>Spezielle Bauelemente</u>	15
3.3.1 Anschlußköpfe	15
3.3.2 Bestrahlungskapseln	16
3.3.3 Meßfühler und -sonden	18
3.4 <u>Bestrahlungserfahrungen</u>	19
4. <u>Zusammenfassung</u>	19
5. <u>Literaturverzeichnis</u>	21
6. <u>Abbildungen</u>	22



## 1. Einleitung

Im Rahmen der Entwicklung von Leistungsreaktoren müssen die verschiedensten Forschungsvorhaben durchgeführt werden. Zu diesen Vorhaben gehören unter anderem die Bestrahlungsversuche an Kernbrennstoff- und Strukturmaterialproben für den Reaktorbau. Hierfür stehen an den Forschungsreaktoren die unterschiedlichsten Bestrahlungseinrichtungen zur Verfügung. Die Entwicklung und Erstellung dieser Bestrahlungseinrichtungen wird u.a. auch von der KFA-Jülich und zwar vorwiegend vom Zentralinstitut für Reaktorexperimente (ZIR) im Auftrag der verschiedensten KFA-Institute und div. Fremdfirmen übernommen.

Eine derartige Bestrahlungseinrichtung besteht im allgemeinen aus zwei Hauptkomponenten und zwar aus dem sogenannten out-of-pile-Teil (Außenaufbauten z.B. Instrumentierungen und Kreislaufsysteme) und dem eigentlichen in-pile-Teil (Bestrahlungseinsätze und -Kapseln). Diese Bestrahlungseinrichtungen wurden meistens nur für eine bestimmte Bestrahlungsaufgabe und für den jeweiligen Forschungsreaktor ausgelegt. Die Vielfalt der anliegenden Bestrahlungsaufgaben und die geforderte schnelle Bewältigung derselben machte jedoch die Entwicklung von immer universeller einsetzbaren Anlagen erforderlich.

Die Lösung dieser Entwicklungsaufgaben läßt sich am besten durch die Anwendung des Baukastenprinzips erreichen. Vergleichende Untersuchungen an den bisher erstellten Bestrahlungseinrichtungen ergaben, daß sich diese im Prinzip alle untereinander ähnlich sind. So werden z.B. für alle Außenanlagen immer wieder Meß-, Regel- u. Kontrolleinrichtungen sowie Regel-, Spül- oder Kühlkreisläufe verwendet und die Bestrahlungseinsätze sind ebenfalls immer wieder aus Anschlußköpfen, Außenhülsen, Abschirmstopfen, Bestrahlungskapseln, Regel- und Spülkreisläufen usw. aufgebaut. (S. auch Abb. 1).

Aus diesem Grunde eignet sich das Baukastenprinzip nicht nur

für die Entwicklung von Außenanlagen, es ist gleichermaßen auch auf die Entwicklung von Bestrahlungseinsätzen anwendbar, wenn man sich hierbei zu einer gewissen Typeneinschränkung durchringen kann. Im folgenden soll die Anwendung dieses Baukastenprinzips an Hand einer im Forschungsreaktor FRJ-2 in Jülich installierten Bestrahlungseinrichtung für Brennstoff- und Strukturmaterialuntersuchungen und zwar hauptsächlich für die Entwicklung der dafür vorgesehenen 2"-Bestrahlungseinsätze beschrieben werden.

Die in dieser Anlage installierten Außenaufbauten werden hierbei nur soweit beschrieben, wie es für die Auslegung der Bestrahlungseinsätze notwendig ist.

## 2. Bestrahlungsaufgaben

Die nachfolgend beschriebene Bestrahlungseinrichtung sollte hauptsächlich für die Bestrahlung von Kernbrennstoffproben in Form von Coated Particles (CP) und für den Reaktortest von Compacts auf Coated Particles-Basis entwickelt werden. Sie sollte jedoch auch für die Bestrahlung von Brennstoffpellets, Testbrennstäben und Strukturmaterialproben einsetzbar sein. Die Abmessungen der Bestrahlungsproben sind hierbei sehr verschieden, so haben z.B. Coated Particles einen Durchmesser von 500-1500  $\mu\text{m}$  und Testbrennstäbe Abmessungen die zwischen 6 und 15 mm Durchmesser und 100-600 mm Länge liegen können.

Diese Bestrahlungsproben sollen im FRJ-2 bei thermischen und schnellen Neutronenflüssen von  $10^{12}$  bis  $2-3 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  und bis zu Fluenzwerten (th/sch) von max.  $10^{22}$  nvt bestrahlt werden. Die  $\gamma$ -Leistungswerte liegen hierbei zwischen 3,5 und 5,0 W/gr (Al). Als Bestrahlungspositionen stehen hierfür fünfundzwanzig 2"-Brennelement- sowie neun 2", fünf 4" und vier 6" Bestrahlungskanäle zur Verfügung, d.h. die hierfür zu entwickelnden Bestrahlungseinsätze müssen bis



zu den vorgenannten Werten voll betriebsfähig und in den verschiedensten Bestrahlungspositionen einsetzbar sein.

Die geforderten Bestrahlungstemperaturen liegen hierbei für Kernbrennstoffproben zwischen 500°C und 2000°C und für Testbrennstäbe und Strukturmaterialproben zwischen 300°C und 1200°C, d.h. für die Erzeugung und Einhaltung dieser Temperaturen müssen die Bestrahlungseinsätze mit Temperaturregeleinrichtungen versehen werden, die entweder aus einer Gasgemischregelung und/oder aus einer elektrischen Zusatzheizung bestehen können.

Außerdem sollen z.B. bei Brennstoffbestrahlungen die freigesetzten gasförmigen Spaltprodukte mit Hilfe spezieller Spülgaskreisläufe untersucht werden u.a.m.

(Die Bestrahlungseinrichtungen an anderen Reaktoren müssen für ähnliche Bestrahlungsdaten ausgelegt werden, so hat z.B. der ebenfalls für CP-Bestrahlungen in Mol/Belgien eingesetzte Forschungsreaktor BR-2 thermische und schnelle Flußwerte bis max.  $10^{15} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  und  $\gamma$ -Leistungswerte bis zu 14w/g (Al)).

### 3. Bestrahlungseinrichtungen

Wie in der Einleitung bereits erwähnt, besteht eine Bestrahlungseinrichtung für Brennstoff- und Strukturmaterialuntersuchungen im allgemeinen aus zwei Hauptkomponenten und zwar aus den sogenannten Außenaufbauten, die wiederum aus den verschiedensten Instrumentierungs- und Kreislaufkomponenten aufgebaut sein können und aus den dazugehörigen Bestrahlungseinsätzen, die im folgenden auch kurz als Rigs bezeichnet werden.

### 3.1 Instrumentierungen und Kreisläufe

Die Außenaufbauten der Bestrahlungseinrichtung wurden weitestgehend nach dem Baukastenprinzip aufgebaut. Sie bestehen aus sechs Hauptbaugruppen, und zwar aus vier Kontrollschränken, vier Regelgaskreisläufen mit einer gemeinsamen Helium- und Stickstoffversorgungsanlage, vier Regelgasbausteinen, vier Aktivitätsmeßstellen und einer gemeinsamen Probenentnahmestation. An diese Außenaufbauten können vier (max. fünf) Bestrahlungseinsätze (Rigs) gleichzeitig angeschlossen werden. Dabei wurde der vierte Kontrollschrank und der vierte Regelgaskreislauf so aufgebaut, daß an ihm zwei Rigs im Parallelbetrieb gefahren werden können. In den Kontrollschränken wurden alle für den Experimentierbetrieb notwendigen Meß-, Regel- und Registriergeräte einschließlich der für Reaktorexperimente erforderlichen Sicherheitsinstrumentierung untergebracht. Über die Regelgaskreisläufe kann mit Hilfe eines Helium-Stickstoffgemisches und den in den Rigs angeordneten Regelgasspalten die Bestrahlungstemperatur je nach Beladung über eine oder mehrere Reaktorperioden konstant gehalten werden. Die in diesen Kreisläufen angeordneten Aktivitätsmeßstellen und die Probenentnahmestation werden für die Lecküberwachung der in den Rigs untergebrachten Bestrahlungskapseln und Spülgaskreisläufe benötigt. (s. Abb. 1 u. 2) [1 u. 3] .

Außerdem wurde für diese Bestrahlungseinrichtung noch ein sogenannter Spülgaskreislauf entwickelt. Dieses Kreislaufsystem aus zehn (zwölf) Helium-Spülkreisläufen mit der entsprechenden Instrumentierung ist für den gleichzeitigen Anschluß von drei bis vier Brennstoff-Bestrahlungseinsätzen (Rigs) und zwar für zwei Vierkapselrigs und zwei Ein- bis Zweikapselrigs oder einem weiteren Vierkapselrig vorgesehen. Mit Hilfe dieser Spülgaskreisläufe können die während der Bestrahlung freigesetzten gasförmigen Spaltprodukte gemessen und analysiert werden [22 u.23] .

### 3.2 Bestrahlungseinsätze

Die Bestrahlungseinsätze (Rigs) sind sich in ihren Hauptbauelementen z.B. den Anschlußköpfen, Außenhüllen, Abschirmstopfen usw. und teilweise auch in ihren Hauptabmessungen untereinander so ähnlich, daß das Baukastenprinzip angewendet werden kann z.B. können alle Coated-Particles-, Compacts-, Brennstoffpellets-, Testbrennstab- und ein großer Teil der Strukturmaterialbestrahlungen mit einer 2" Rigausführung und größere Compacts- und Brennelementbestrahlungen mit einer 4" Rigausführung erfolgen. Vor allem, wenn man diese Rigs für die jeweils kleinste Bestrahlungsposition auslegt und sie dann mit Hilfe von 2 und 4" bzw. 6" Futterrohren auch für andere Bestrahlungspositionen verwendbar macht. Durch diese Maßnahme kann jede der vorgenannten Bestrahlungspositionen des FRJ-2 für die Bestrahlung nutzbar gemacht werden.

Aufgrund der vorliegenden Bestrahlungsaufgaben wurde vorerst nur die Entwicklung eines 2"-Baukastenrigs beschlossen. Im Zuge der Elementarisierung wurde das 2"-Rig zunächst in zehn Hauptbauelemente (Hauptbausteine) zerlegt, und zwar in die Ziehvorrichtung, den Anschlußkopf, das Außenrohroberteil, eine Al-Fe-Verbindung, das Außenrohrunterteil, den Abschirmstopfen, die Zwischenstücke, die Bestrahlungskapseln, die Probenträger und die Bestrahlungsproben selbst. Jeder dieser Hauptbausteine besteht wiederum aus div. Bau- und Einzelteilen (s. Abb. 3) [1,7 u. 8] .

Hierbei sind die ersten 6 Hauptbausteine für fast jede Rigvariante gleichbleibend aufgebaut. Diese Hauptbausteine bestimmen gleichzeitig die Hauptabmessungen des Rigs. Die Verbindungsstellen und die Anschlußmaße dieser Hauptbausteine wurden weitestgehend genormt. So wurden z.B. für die Verbindungsstellen des Anschlußkopfes mit den Außenrohren und für die Außenrohre selbst die Maße 54 bzw. 50 mm als Paßdurchm. festgelegt. Die Anordnung und Anzahl der Zwischenstücke, der Bestrahlungskapseln, der Probenbehälter und der



Bestrahlungsproben selbst sind im Rahmen der projektierten Möglichkeiten für die verschiedensten Bestrahlungsaufgaben frei wählbar. (s. Abb. 3 u. 4). [1]

Die Ziehvorrichtung besteht aus einem Ziehpilz und einer Gewindehülse. Sie ist aus Normalstahl und wird mit Hilfe der Gewindehülse auf das unterhalb des Thermoelementsteckers am Anschlußkopf angeordnete Gewindestücke aufgeschraubt (s. Abb. 3).

Der Anschlußkopf einer derartigen Rigausführung muß für den max. Ausbauzustand ausgelegt werden. Er kann jedoch für einfachere Rigvarianten durch Weglassen von div. Bauteilen im Aufbau vereinfacht oder, falls erforderlich, auch gegen einen völlig anders aufgebauten Anschlußkopf ausgetauscht werden. Der Anschlußkopf selbst ist aus Edelstahl gefertigt und auf seiner Oberseite mit allen, für den Bestrahlungsbetrieb erforderlichen Anschlüssen versehen. Er ist auf seiner Unterseite über einen Zapfen von 54 mm  $\varnothing$  und zwei O-Ringdichtungen in das Außenrohrborteil eingepaßt. Auf seiner Ober- und Unterseite können für max. fünf Regel- und Spülgaskreisläufe je zwei Magnetventile angeordnet werden. Mit Hilfe dieser Magnetventile können diese Kreisläufe auch während des Reaktorbetriebes z.B. bei erhöhter Aktivitätsfreisetzung vollautomatisch geschlossen werden. Außerdem sind an der Oberseite des Anschlußkopfes noch die gasdichten Thermoelement- und Magnetventilstecker angeordnet (s. Abb. 3 u. 11).

Das Außenrohrborteil ist ebenfalls aus Edelstahl und zu Abschirmzwecken mit einem gestuften Außendurchmesser von 57/54 mm versehen. Es nimmt in seinem Inneren den Abschirmstopfen mit 50 mm  $\varnothing$  auf. An seiner Oberseite ist der Anschlußkopf mit drei Paßstiften befestigt, die nach der Fertigmontage durch Schweißpunkte gesichert werden. An seiner Unterseite ist es mit einem 50 mm Paßdurchmesser versehen, an den entweder über einen Paßring ein Außenrohrunterteil aus Edelstahl oder über eine Al-Fe-Verbindung und einen Paßring ein Außenrohrunterteil aus AlMg3 angesetzt werden kann (s. Abb. 3 u. 4).

Die Al-Fe-Verbindung besteht aus AlMg3 und Edelstahl (W.Nr. 4541). Die Übergangsstelle ist konisch ausgebildet und wird im Diffusionschweißverfahren hergestellt. [4 u. 5]. Die Abmessungen liegen je nach Anwendungsbereich zwischen 54 mm Außen- und 43-48 mm Innendurchmesser (s. Abb. 3 u. 4).

Das Außenrohrunterteil besteht entweder aus Edelstahl oder aus AlMg3 und ist auf seiner Innenseite je nach Bedarf mit 2 - 8 Innennuten für die Aufnahme der Regel- und Spülgasleitungen und div. Thermoelemente versehen. Der freie Innendurchmesser beträgt max. 43 mm. Es wird während der Fertigungsmontage entweder direkt (bei Edelstahlausführung) oder über die Al-Fe-Verbindung mit dem Außenrohrroberteil verschweißt und ist an seiner Unterseite durch eine eingeschweißte Rigspitze verschlossen (s. Abb. 3 u. 4).

Der Abschirmstopfen besteht aus einem mit Araldit und Stahlschrot gefüllten, dickwandigen Edelstahlrohr, das auf seiner Außenseite drei unter  $120^{\circ}$  gewendelte Nuten besitzt, die für die Aufnahme der Regel- und Spülgasleitungen und für die Verlegung der Thermoelemente u.a.m. vorgesehen sind. Er ist oben und unten durch einen Edelstahlstopfen verschlossen und hängt über zwei Zwischenstücke frei am Anschlußkopf im Außenrohrroberteil. Der untere Verschlußstopfen ist außerdem mit einem Zapfen versehen, an dem nach Bedarf die Bestrahlungskapseln oder -proben über ein weiteres Zwischenstück angehängen werden können (s. Abb. 3 u. 4).

Die frei wählbaren Hauptbausteine, d.h. die Bestrahlungskapseln, die Probenenträger und die Bestrahlungsproben selbst sind für jede Ausführungsvariante anders aufgebaut. Ihre genaue Beschreibung kann daher nur im Zusammenhang mit den einzelnen Rigvarianten erfolgen (s. Abb. 3).

Alle Hauptbausteine und ein Teil der Bauteile (Magnetventile, Anschlußstecker, usw.) sind bei einem Baukastenrig vollständig vormontierbar und vorprüfbar und können zur Vor-

ratshaltung vorgefertigt und eingelagert werden. Hierdurch konnte vor allen Dingen der Zeitraum zwischen Probenanlieferung und Reaktoreinsatz gegenüber der konventionell gefertigten Rigausführung erheblich verkürzt werden.

Die für ein 2"-Baukastenrig projektierten Ausführungsvarianten können dem Baumusterplan entnommen werden (s. Abb. 4). [1]  
Die hier angegebenen acht Rigvarianten sollen einen groben Überblick über die Ausführungsmöglichkeiten eines nach dem Baukastenprinzip aufgebauten Rigs geben, z.B.:

#### Erstellte bzw. entwickelte Rigausführungen

- Ausf. 1 Einkapselausführung, geregelt, gespült für CP-Bestr.  
" 2 Vierkapselausführung, geregelt, 4-fach gespült für CP-Bestr.  
" 3 Einkapselausführung, geregelt, gespült, für CP-Bestr. (in den Heißen Zellen fertig montierbar)  
" 4 Brennstabausführung, geregelt, ungespült für BE-Pellets in Na-Bonding  
" 5 Sechskapselausführung, geregelt, ungespült für BE-Proben in Na

#### Geplante Rigausführungen

- " 6 Ein- bis Zweikapselausführung, geregelt, gespült für Thermoelement- und Sonderbestrahlungen  
" 7 Ein- bis Dreikapselausführung, geregelt mit Heizung für Strukturmaterialbestrahlungen  
" 8 Rohrpostausführung für Isotopenbestrahlung mit Sonderanschlußkopf u.a.m.

Hiervon wurden die Rigausführungen 1,2 und 4 bereits im Reaktoreinsatz getestet, wobei die Ausführung 2 in 3 Exemplaren gleichzeitig im FRJ-2 bestrahlt wurde, während die Ausführungen 3 und 5 noch in der Entwicklung sind.

Im folgenden werden unter 3.2.1 bis 3.2.4 die Rigausführungen 1-5 genauer beschrieben.



### 3.2.1 Einkapselausführung (s. Abb. 4 u. 5)

Die Rigausführungen eins und drei sind sich in ihrem Grundaufbau ähnlich. In beiden Fällen handelt es sich um eine sogenannte Einkapselausführung, die für die Bestrahlung von zehn verschiedenen Coated-Particles (CP)- bzw. Compacts-Chargen entwickelt wurde. Die Ausführung drei ist hierbei nur eine Sonderausführung von eins, die sich, falls erforderlich in den Heißen Zellen mit bereits bestrahlten Brennstoffproben beladen und fertigmontieren läßt.

Diese Einkapselausführung ist mit einem Regelgaskreislauf und einem Spülgaskreislauf versehen. Davon ist der Regelgaskreislauf mit dem Regelgasspalt und der Spülgaskreislauf mit der Bestrahlungskapsel verbunden. Beide Kreisläufe können über die am Anschlußkopf angeordneten Magnetventile geschlossen werden (s. auch 3.1 und 3.3.1).

Die Bestrahlungstemperatur wird bei dieser Ausführung ausschließlich durch die nukleare Aufheizung der Rigeinbauten und der Brennstoffproben selbst erzeugt. Hierdurch sind je nach Brennstoffbeladung und Kapselaufbau Bestrahlungstemperaturen zwischen 800 und 1800<sup>0</sup>C (bei Variante drei zwischen 600 und 1200<sup>0</sup>C) am Brennstoff erreichbar. Die Betriebstemperatur der Bestrahlungskapsel kann hierbei zwischen 300 und 600<sup>0</sup>C liegen (s. Auch Abb. 9 ) [2.]

Für die Überwachung der Bestrahlungstemperaturen können max. zweiundzwanzig Thermoelemente und zwar vier Hochtemperaturthermoelemente vom Typ W/WRe und zwölf Ni/Cr-Thermoelemente für den Bestrahlungskapselbereich, und der Rest für sonstige Meßaufgaben eingesetzt werden. Außerdem sind in der Rigspitze noch zwei als Feuchtefühler ausgebildete Ni/CiCr-Thermoelemente für die Wasserlecküberwachung der Außenbehälterrohre angeordnet.

Die frei wählbaren Hauptbausteine sind bei dieser Ausführung wie folgt aufgebaut:

Im freien Raum des Außenrohrunterteils wird im Core-Bereich

eine ca. 800 mm lange Bestrahlungskapsel aus Edelstahl eingesetzt, die über ein Zwischenstück frei am Abschirmstopfen hängt. Die Kapsel ist an ihrem oberen Ende durch einen Deckel verschlossen, der gleichzeitig als Thermoelement und Spülgasrohrdurchführung ausgebildet ist. Sie enthält in ihrem unteren Teil einen ca. 500 mm langen Graphiteinsatz, in dem entweder fünf Graphitprobenbehälter mit je zwei Ringspaltkammern für die Aufnahme der CP oder/und div. Compacts untergebracht werden können. Der Graphiteinsatz ist über einen Wärmespalt und Abstandsnocken in der Bestrahlungskapsel eingepaßt. Das gleiche gilt für die in den Graphiteinsatz eingesetzten Probenbehälter oder Compacts, auch dort ist ein Wärmespalt vorgesehen. Die Graphitteile sind mit div. Bohrungen für die Aufnahme der Thermoelemente und evtl. erforderlicher Fluenzmonitore versehen. Der Graphiteinsatz selbst wird über je eine Wärmeschildbarriere aus Edelstahlscheiben an beiden Enden und ein weiteres federbelastetes Zwischenstück am oberen Ende in der Bestrahlungskapsel zentriert.

Das Spülgas wird über ein Führungsrohr in die Spitze der Kapsel geleitet und strömt von dort über entsprechende, in den Graphitteilen angeordnete Bohrungen und Schlitze an den CP bzw. an den Compacts vorbei und wird am oberen Ende des Graphiteinsatzes über ein Mittelröhrchen aus Sondermaterial (z.B. Ta) abgesaugt. In der Spülgasrückleitung ist aus Sicherheitsgründen noch ein Jodfilter untergebracht (s. Abb. 14). Hierdurch wird eine Kontamination der Spülgasrückleitung und der Anschlüsse vermieden.

Die Bestrahlungskapsel ist im Außenrohrunterteil über 12 axial angeordnete Edelstahldrähte von 0,4 mm  $\varnothing$  zentriert. Über den hierdurch zwischen beiden Teilen gebildeten Regelgasspalt kann mit Hilfe des über ein Führungsrohr in die Rigspitze geleiteten Regelgasgemisches (z.B. Helium und Stickstoff) die Bestrahlungstemperatur beeinflußt werden.

Das Außenrohrunterteil ist aus neutronenökonomischen Gründen aus AlMg3 und wird über eine Al-Fe-Verbindung mit dem Außen-

rohrortenteil (VA) verschweißt. Es ist außerdem mit vier Innen-  
nuten für die Aufnahme der Thermoelemente, Feuchtefühler und  
des Regelgasführungsrohres versehen. [7]

Alle anderen Rigausführungen sind von dieser Ausführung ab-  
geleitet. Sie werden jeweils nur soweit beschrieben, wie sie  
hiervon abweichen.

### 3.2.2\_Vierkapselausführung\_(s.\_Abb.\_4,\_6\_u.\_7)

Die Rigausführung zwei wurde als Vierkapselausführung für die  
Bestrahlung von acht bis zwölf verschiedenen CP oder Compacts-  
Chargen entwickelt. Sie ist im Gegensatz zur Einkapselaus-  
führung mit einem Regelgaskreislauf und vier Spülgaskreis-  
läufen, d.h. für jede Bestrahlungskapsel einen, versehen. Die  
Regel- und Spülgaskreisläufe können auch hier bei Bedarf  
über die am Anschlußkopf angeordneten Magnetventile geschlos-  
sen werden (s. auch 3.1 und 3.3.1).

Die Bestrahlungstemperatur wird auch bei dieser Rigausführung  
mit Hilfe der nuklearen Aufheizung erzeugt. Jedoch sind die  
hierbei erreichbaren Bestrahlungstemperaturen aus konstruk-  
tiven Gründen etwas niedriger, sie liegen zwischen 600  
und 1600°C. Der radiale Kapselaufbau entspricht dem der Rig-  
ausführung eins und drei, so daß sich wiederum ähnliche Be-  
triebstemperaturen (z.B. 300 bis 600°C für die Bestrahlungs-  
kapsel) ergeben (s. auch Abb. 9) [2] .

Die Anzahl der Thermoelemente bleibt gleich, (max. 22 Thermo-  
elemente) nur ihre Zuordnung ändert sich entsprechend der  
neuen Kapselanordnung. Die Anzahl und Anordnung der Feuchte-  
fühler bleibt unverändert (2 Stück in Rigspitze).

Die frei wählbaren Hauptbausteine sind wie folgt aufgebaut.  
Im freien Raum des Außenrohrunterteils sind diesmal vier  
einzelne Bestrahlungskapseln von je ca. 110 mm Länge überein-  
ander angeordnet. Jede Bestrahlungskapsel ist über ein flexibles  
Zwischenstück mit der nächsten verbunden und alle Kapseln



hängen frei an ihren Spülkreisleitungen im Außenrohrunterteil. Mit den Spülkreisleitungen werden gleichzeitig die Thermo - elemente in die Kapseln eingeführt. In diesen Leitungen sind oberhalb der Core-Zone die einzelnen Thermoelementdurchführungen angeordnet. In jeder Rückführleitung befindet sich außerdem noch ein Jodfilter. Die Kapselsäule wird über eine in der Rigspitze angeordnete Druckfeder und eine Wärmeschildbarriere abgestützt. Für den Ausgleich der Wärmespannungen sind sämtliche Spülkreisrohrleitungen und die Thermoelemente gewandelt zum Abschirmstopfen geführt. In jeder Bestrahlungskapsel ist wiederum ein Graphiteinsatz angeordnet, in den entweder je ein bis zwei Graphitprobenbehälter mit zwei bis drei Rigspaltkammern für die Aufnahme der CP oder zwei bis drei Compacts untergebracht werden können. Der Graphiteinsatz und die Probenbehälter bzw. die Compacts sind auch hier wieder über Wärmespalte und Abstandsnocken in der Kapsel zentriert. Oberhalb und unterhalb des Graphiteinsatzes sind in diesem Fall je eine Mo-Scheibe, vier Wärmeschilde und ein Abstandsring angeordnet. Hierbei übernehmen die Wärmeschilde gleichzeitig die Funktion von Tellerfedern, so daß die entstehenden Wärmespannungen abgebaut werden können. (s. auch Abb. 12)

Die Spülgasausführung in den Bestrahlungskapseln bleibt unverändert.

Die vier Bestrahlungskapseln sind außen über acht axial verlaufende und im Außenrohrunterteil befestigte Edelstahldrähte im Außenrohr zentriert. Der dabei entstehende Regelgasspalt wird wieder für die Temperaturregelung verwendet.

Das Außenrohrunterteil besteht auch hier aus AlMg3 und hat diesmal acht Innennuten für die Aufnahme der Spülkreislaufrohre und Thermoelemente. Es wird ebenfalls über eine Al-Fe-Verbindung mit dem Außenrohroberteil verschweißt. [7]

### 3.2.3 Brennstabausführung (s. Abb. 4 u. 8)

Die Rigausführung vier wurde als offene ungespülte Einkapselung für die Bestrahlung von zwölf Testbrennstäben entwickelt, die Brennstoffpellets in Natriumbonding enthalten. Hierbei stellt jeder Testbrennstab eine in sich abgeschlossene "Bestrahlungskapsel" dar. Aus diesem Grunde war für dieses Rig nur der Regelgaskreislauf erforderlich. Der ebenfalls bei der Einkapselung übliche Spülgaskreislauf wurde in diesem Fall für die Spülung einer Sonderbestrahlungskapsel eingesetzt. Beide Kreisläufe können auch hier wieder über Magnetventile geschlossen werden (s. auch 3.1 u. 3.3.1).

Die Bestrahlungstemperatur wird ebenfalls durch die nukleare Aufheizung erzeugt. Jedoch liegen die benötigten Temperaturen hierbei sehr viel niedriger. Sie betragen nur 450 bis 550°C und sind außerdem in diesem Bereich regelbar. (s. Abb. 10) [2]

Für die Überwachung der Bestrahlungstemperatur stehen wiederum max. 22 Thermoelemente zur Verfügung. Hiervon wurden 12 Ni/Ni Cr-Thermoelemente bereits vom Hersteller der 12 Testbrennstäbe als Zentralthermoelemente in diese eingebaut. Die Anzahl der Feuchtefühler bleibt unverändert (2 Stck. in Rigspitze).

Die frei wählbaren Hauptbausteine sind in diesem Fall wie folgt aufgebaut:

Im freien Raum des Außenrohrunterteils ist im Core-Bereich eine ca. 600 mm lange Bestrahlungskapsel angeordnet, die ebenfalls über ein Zwischenstück frei am Abschirmstopfen hängt. Jedoch handelt es sich diesmal um eine sogenannte offene Bestrahlungskapsel, deren Deckel und Boden mit speziellen Bohrungen versehen sind. Durch diese Bohrungen strömt das Regelgasgemisch (z.B. Helium und Stickstoff) von unten nach oben durch die Kapsel.

Die Kapsel selbst, die wiederum aus Edelstahl besteht, ist jedoch ohne Spalt in das ebenfalls mit vier Nuten versehene

Außenrohrunterteil eingepaßt. In der Kapsel sind über einen Wärmespalt (Regelgasspalt) und Abstandsnocken zwei Graphitformkörper übereinander angeordnet. Jeder Formkörper kann in den entsprechenden Bohrungen sechs Testbrennstäbe sowie div. Thermoelemente und Fluenzmonitore aufnehmen. Die Testbrennstäbe haben einen Durchmesser von 6 mm und eine Länge von 150 bis 200 mm.

Das Regelgas strömt über ein Zuführungsrohr in die Rigspitze und von dort durch den Syphon ähnlich aufgebauten Kapselboden in den Regelgasspalt der Kapsel. Durch die besondere Bodenkonstruktion kann das bei einem Bruch der Testbrennstäbe ausströmende Natrium nicht in die Rigspitze fließen und wird somit von dem in der Kapsel befindlichen Graphit abgebunden.

Das Außenrohrunterteil ist diesmal aus sicherheitstechnischen Gründen und wegen der geforderten Flußabsenkung in Edelstahl ausgeführt, es wird ohne Al-Fe-Verbindung mit dem Außenrohr-oberteil verschweißt. Das Rig selbst wurde für diese Bestrahlung über ein sogenanntes Futterrohr in eine 4"-Bestrahlungsposition des FRJ-2 eingesetzt. [8 u. 17] .

#### 3.2.4 Sechskapselausführung (s. Abb. 4 )

Die Rigausführung fünf wird als Sechskapselausführung für die Bestrahlung von Brennstoffproben in Natrium entwickelt. Ihr Kapselaufbau ist dem der Vierkapselanordnung sehr ähnlich, jedoch sind die Bestrahlungskapseln nicht mehr mit Spülgaskreisläufen versehen. Aus diesem Grunde besitzt diese Ausführungsvariante nur einen Regelgaskreislauf.

Als Bestrahlungstemperatur sind z.Zt. 500 bis 600°C vorgesehen, wobei die Erzeugung derselben wiederum durch die nukleare Aufheizung erfolgt.

Die Kapseln werden mit den erforderlichen Thermoelementen bestückt und sind über einen Regelgasspalt in dem aus Al be-



stehenden Außenrohrunterteil eingepaßt. Jede Bestrahlungskapsel ist ca. 60 bis 80 mm lang und enthält im Inneren eine Brennstoffprobe in Natrium. Alle Kapseln sind aus Edelstahl und über Zwischenstücke übereinander in einem Führungskorb aus Edelstahl angeordnet. Dieser Korb hängt über ein Zwischenstück frei am Abschirmstopfen.

Das Regelgas wird wieder über ein Führungsrohr in die Rigspitze geleitet. Dort befinden sich ebenfalls zwei Feuchtefühler.

### 3.3 Spezielle Bauelemente

Zu den speziellen Bauelementen eines Bestrahlungsrigs gehören u.a. die Anschlußköpfe, die Bestrahlungskapseln und die Meßfühler und -sonden.

#### 3.3.1 Anschlußköpfe (s. Abb. 11)

Die Anschlußköpfe für ein Baukastenrig müssen, wie bereits erwähnt, für den max. Ausbau ausgelegt werden. Jeder Anschlußkopf besteht aus Edelstahl und ist mit den verschiedensten Bohrungen für den Anschluß der Regel- und Spülgasleitungen versehen. Diese Leitungen werden teils durch Schweißen, teils durch Hartlöten am Kopf befestigt und werden an ihren Enden mit den entsprechenden Kupplungsteilen (Braun oder Dilo) versehen. Jeder Regel- und Spülkreisanschluß ist mit einem stromlos geschlossenen Magnetventil (Type Skinner) abgesichert. Diese Ventile werden als sog. Operatortypen vom Hersteller bezogen und anschließend auf senkrechten Durchgang umgebaut. Sie werden entweder über Kupplungsteile an den Spülkreisrückleitungen befestigt oder direkt in die entsprechenden Gewindebohrungen der Regel- und Spülkreis-Zu- und Ableitungen im Anschlußkopf eingeschraubt. Als Steckverbindungen für den Anschluß der Thermoelemente und der Magnetventilstromversorgung haben sich Hermeticsteckverbindungen mit Goldkontakten (Type Deutsch) bei Leckraten  $<10^{-8}$  Torr L/s gut bewährt. Als

Dichtungsmaterial für O-Ringe und Ventilplunger empfiehlt sich die Verwendung von Viton statt Perbunan, für O-Ringe kann auch Silicon bei Betriebstemperaturen bis  $160^{\circ}\text{C}$  verwendet werden. Die Strahlenbeständigkeit von Perbunan ist zwar besser als die von Viton oder Silicon, jedoch liegen alle O-Ringverbindungen für diese Rigausführungen außerhalb des Strahlenfeldes hinter der Abschirmung, so daß die Auswahl nach der Temperaturbeständigkeit erfolgen konnte [5, 7 u. 8].

### 3.3.2 Bestrahlungskapseln (s. Abb. 12 u. 13)

Die Bestrahlungskapseln gehören zu den kompliziertesten und am höchsten beanspruchten Bauteilen eines Rigs. Sie werden soweit sie aus Edelstahl bzw. hochnickelhaltigen Legierungen (Inconel usw.) bestehen, bis zu Betriebstemperaturen von max.  $800^{\circ}\text{C}$  und wenn sie z.B. aus Niob gefertigt werden, bei Temperaturen von  $800^{\circ}\text{C}$  bis max.  $1000^{\circ}\text{C}$  eingesetzt. Diese Betriebsweise erfordert die Anwendung spezieller Fertigungsmethoden [4, 5 u. 6], d.h. alle Bestrahlungskapseln sowohl in Edelstahl als auch in Niobausführung werden z.Zt. vollständig elektronenstrahlgeschweißt. Lediglich die Thermoelementdurchführungen für Ni/NiCr und W/WRe Thermoelemente mit Edelstahl bzw. Tantalmänteln werden noch durch Hochtemperatur-Vakuumlötverfahren unter Verwendung von pulverförmigen Ni-Basisloten ausgeführt. Jedoch müssen die Thermoelemente vor und hinter den Lötstellen mechanisch so festgelegt werden, daß sie nach dem Löten nicht mehr gebogen werden können. Dies gilt auch für evtl. eingelötete Spülkreisrohre. Bei allen Biegeoperationen an Thermoelementen und Rohren besteht die Gefahr, daß sich an den Lötstellen dieser Durchführungen Microrisse bilden, die dann bei den hohen Betriebstemperaturen weiter reißen und zu Kapsellecks führen können. Derartige Schäden treten vor allem dann auf, wenn diese Bauteile noch durch Wärmespannungen beansprucht werden. Da sich aber in den meisten Bestrahlungskapseln Kernbrennstoffproben befinden, kann ein Leck in denselben und damit der Austritt von radioaktiven Spaltprodukten äußerst unangenehme Folgen haben [4, 5, 6, 10, 11 u. 12].

Die vorgenannten Hochtemperaturlötungen waren jedoch für einen in Zusammenarbeit mit Mol/Belgien entwickelten 1 1/2" Bestrahlungseinsatz bei Thermoelement- und Spülkreisrohrdurchführungen an Niobkapseln nicht einwandfrei herzustellen. Aus diesem Grunde wurde für diesen Bestrahlungseinsatz eine neue Kapselausführung entwickelt, die im Hochtemperaturbereich aus 100 % Niob besteht und vollständig elektronenstrahlgeschweißt ist. (S. Abb. 14) [5, 6 u. 21]

Die Ausführung der Bestrahlungskapseln in Niob war hierbei unumgänglich, da die  $\gamma$ -Aufheizungswerte des BR2 in Mol mit 14 W/g den Einsatz von Edelstahl als Kapselmateriale unmöglich machten. Die dabei auftretenden Kapseltemperaturen lagen bei 800 bis 1000°C. In diesem Temperaturbereich ist Edelstahl nicht mehr einsetzbar, jedoch erfordert der Einsatz von Niob gleichzeitig die Verwendung von hochreinen Gasen für die Regel- und Spülkreisläufe. [10, 11, 12, 13 u. 14]

Die für die Temperaturmessung benötigten Hochtemperaturthermoelemente werden hierbei über sogenannte Fingerhutrohre in die Kapsel eingeführt. Diese Niob-Fingerhutrohre sind zwar bis 1600°C noch heliumdicht ( $\approx 1 \times 10^{-6}$  Torr L/s), sie können jedoch bei diesen Temperaturen nicht mehr in direktem Kontakt mit Graphit eingesetzt werden. Vorversuche hierzu ergaben starke NbC-Bildungen, die bis zur vollständigen Zerstörung der Rohre führten (bei 1500°C in 100 h). Diese Versuche ergaben jedoch auch, daß bereits geringe Spalte von 100 bis 300  $\mu\text{m}$  zwischen Niob und Graphit genügten, um die NbC-Bildung weitestgehend zu verhindern. Versuche mit Schutzrohren aus Nb, Ta, Re bei gleichzeitigen geringen Spalten von einigen 100  $\mu\text{m}$  ergaben das beste Ergebnis. Dies trifft vor allem auf Schutzrohre aus Re zu, diese sind zwar sehr teuer, jedoch dürfte ihr Einsatz in Bestrahlungsrigs für Hochflußreaktoren (z.B. BR2 in Mol) durch die größere Lebensdauererwartung der Niob-Bestrahlungskapseln gerechtfertigt sein. [5, 6, 13, 14, 20, 21]

### 3.3.3 Meßfühler und -Sonden (s. auch Abb. 12 u. 13)

Als betriebssicherste Thermoelemente bis zu Temperaturen von 1000 bis 1100°C, auch bei Einsatz in Graphit, haben sich Ni/NiCr Thermoelemente mit Edelstahl (oder Inconelmantel) erwiesen. Für Hochtemperaturmessungen bis zu 1600°C und darüber hinaus bis zu max. 2000°C haben sich W/Re Thermoelemente mit W3(5)%Re/W25(26)%Re, BeO-Isolierung und Tantal-Mantel bewährt. Jedoch sind diese Thermoelemente nicht immer gleichbleibend in ihrer Qualität und Ausführung. [15]

Dies trifft vor allem auf die Art und Ausführung der Meßstellen und der Übergangsmuffen zur Ausgleichleitung sowie auf die Isolationswerte zu. Ausfälle während der Bestrahlung waren hauptsächlich auf Meßstellenbrüche durch Thermoschocks (Reaktornotabschaltungen) oder Langzeitbeanspruchung und auf Kurzschlüsse durch zu enge Biegeradien zurückzuführen. Die Ausfallraten lagen hierbei zwischen 10 und 100 %. Als Gegenmaßnahme empfiehlt sich das Anbringen von sog. Referenzthermoelementen in Kapselzonen mit geringen Temperaturen. Bei Ausfall der Hochtemperaturthermoelemente kann man dann mit Hilfe thermodynamischer Berechnungen die Bestrahlungstemperatur hinreichend genau ermitteln. [2]

Für die Lecküberwachung der Außenrohrteile eines Rigs gegenüber dem Reaktortankwasser (D<sub>2</sub>O) sind z.Zt. besondere Feuchtefühler in der Entwicklung bzw. in der Erprobung. Diese arbeiten z.B. auf der Basis eines Ni/NiCr-Mantelthermoelementes mit offener Meßstelle, deren Isolationswiderstandsänderung bei Wassereinbruch für die Auslösung einer Reaktorwarnung benutzt wird.

Zur Beurteilung des Bestrahlungsverhaltens der eingesetzten Proben ist außerdem die genaue Kenntnis der während der Bestrahlung aufgenommenen Neutronenfluenz (th u. sch) erforderlich. Hierfür werden Drahtsonden aus Co, Ni, Fe usw., die in kleine Keramik- oder Inconelröhrchen eingeschmolzen bzw. eingeschweißt sind, verwendet. Diese Sonden können, wenn sie in Aluminiumsilikat Keramik untergebracht sind, bis ca. 1200°C

in Graphit oder bei Inconelausführung bis ca. 800°C an den Kapselmaterialien angeordnet werden. [16]

Die Einsatzmöglichkeiten für direktanzeigende Neutronenflußmeßsonden (Beta-Stromdetektoren) werden z.Zt. in Vorversuchen geklärt.

### 3.4 Bestrahlungserfahrungen

Im Rahmen der Brennstoffbestrahlungsaufgaben wurden u.a. vom ZIR in Jülich bisher insgesamt sechszwanzig Bestrahlungseinsätze (Rigs) für den FRJ-2 in Jülich und den BR2 in Mol/ Belgien gefertigt und zwar dreizehn 2"-Partikelrigs (JP-Rigs), ein 2"-Brennstabrig (JB-Rig) und sieben 4"-Kugelbrennelementrigs (JK-Rig) für den FRJ-2 und fünf 1 1/2"-Partikelrigs (BO-Rigs) für den BR2-Mol. Davon sind z.Zt. noch zwei 2"-Partikelrigs (JP-Rig der Baukastenausführung 2) im FRJ-2 und zwei 1 1/2"-Partikelrigs (BO-Rigs) im BR2 im Einsatz.

In das Bestrahlungsdiagramm Abb. 15, auf dessen Y-Achse die Anfangsbestrahlungstemperaturen in "°C" und auf deren X-Achse die thermische Fluenz in "nvt" angegeben sind, wurden einige der wichtigsten Partikel- und Kugelbestrahlungsrigs eingetragen. Hieraus kann man ersehen, daß mit den vorgenannten Rigs, sowohl Bestrahlungstemperaturen bis ca. 2000°C, als auch thermische Fluenzwerte bis ca.  $6 \times 10^{21}$  erreicht werden konnten. [17, 18, 19, 20 u. 21 ]

### 4. Zusammenfassung

Im vorliegenden Bericht sollte an Hand einer im FRJ-2 in Jülich zu erstellenden Bestrahlungseinrichtung für Kernbrennstoff- und Strukturmaterialbestrahlungen untersucht werden, inwieweit sich das Baukastenprinzip auch für die Entwicklung und Erstellung derartiger Anlagen und zwar hauptsächlich für die Erstellung der sogenannten "in pile Teile" (Bestrahlungseinsätze bzw. Rigs) anwenden läßt.



Hierbei ergab sich , daß dieses Prinzip für die Erstellung der "out of pile Teile" (Außenaufbauten z.B. Kreislaufsysteme u. Instrumentierungen) bereits weitestgehend angewendet wurde. Im Gegensatz dazu mußten jedoch für die "in pile Teile" (Rigs) für jede neue Bestrahlungsaufgabe auch neue Rigausführungen entwickelt werden.

Aus diesem Grunde wurden im Rahmen eines Entwicklungsauftrages die Anwendungsmöglichkeiten dieses Prinzips für die Erstellung von Rigs untersucht. Hierbei ergab sich, daß ein großer Teil der geforderten Bestrahlungsaufgaben in einer 2"-Rigausführung durchgeführt werden konnte. Dies führte zur Entwicklung eines 2"-Baukastenrigs, dessen genauer Aufbau in diesem Bericht beschrieben wird.

Durch diese Entwicklung konnten vor allem Erfahrungen für die Erstellung weiterer Rigausführungen für diesen und andere Reaktoren gewonnen werden, denn Baukastenrigs lassen sich grundsätzlich für jeden Reaktortyp entwickeln, wenn man sich zu einer gewissen Rigtypeneinschränkung durchringen kann und wenn diese Entwicklung durch die entsprechenden Bestrahlungsaufträge abgesichert ist.

## 5. Literaturverzeichnis

- [1] Borowski, K.H.:  
Das Baukastensystem in der Technik. Berlin (usw.):  
Springer 1961
  
- [2] Stelzer, F.:  
Auslegung von Hochtemperatur-Brennstoffrögen.  
Kerntechnik 10 (1968) S. 315
  
- [3] Preussner, A.:  
Instrumentierung von Reaktorexperimenten.  
Kerntechnik 10 (1968) S. 484
  
- [4] Lehrheuer, W.:  
Diffusionsschweißen von austenitischen Chrom-Nickel-  
Stählen mit Aluminium.  
Kerntechnik 10 (1968) S. 208
  
- [5] Lehrheuer, W.; Lison, R.:  
Anwendung moderner Schweiß- und Lötverfahren zur Ferti-  
gung von kerntechnischen Versuchseinrichtungen.  
DVS Bericht 15, Nov. 1970
  
- [6] Lehrheuer, W.; Lison, R.:  
Hochtemperaturlöten von Thermoelement- und Rohrdurch-  
führungen an Reaktoreinschüben für Reaktorexperimente.  
Jül-681-RX, Juli 1970
  
- [7] Schmidt, F.:  
Bestrahlungskapseln für beschichtete Teilchen am FRJ-2.  
Sicherheitsbericht LV30.1 u. 2.  
KFA Jülich, Juli 1969
  
- [8] Meuthen, W.:  
Bestrahlungskapsel für Testbrennstäbe am FRJ-2.  
Sicherheitsbericht LV30.4.  
KFA Jülich, Mai 1970

- [ 9] Thümmler, F.; Gebhardt, E.:  
Reaktorwerkstoffe Teil 1  
Metallische Werkstoffe  
B.G. Teubner, Stuttgart 1964
  
- [10] Zeuner, H.:  
Zeitstandfestigkeit austenitischer Stähle  
im umgeformten und gegossenen Zustand  
für Anlagen der Erdölverarbeitung  
Nickel-Berichte, Heft 6/7, Juni/Juli 1967
  
- [11] Mechanische und physikalische Eigenschaften  
der austenitischen Chrom-Nickel-Stähle  
bis hohen Temperaturen  
Nickel-Informationen, Heft 40, 1965
  
- [12] Warmfeste Wiggins-Werkstoffe  
(Inconel, Incoloy, Nimonic, u.a.)  
Henry Wiggin & Company Engl.  
Informationsheft Nr. 3044, 1964
  
- [13] Hansen, M.:  
Constitution of Binary Alloys  
Mc-Graw-Hill Book Company; New York 1958
  
- [14] Elliott, R.P.:  
Constitution of Binary Alloys  
First Supplement  
Mc-Graw-Hill Book Company; New York 1965
  
- [15] Manufacturing specification for high temperature  
thermocouples for use in nuclear irradiation ex-  
periments  
Technical note IT/71/301  
EUR/PET/3375/71/e.

- [16] Weise, L.:  
Die Bestimmung der Fluenz thermischer  
Neutronen mit Hilfe von Kobaltsonden  
Jül-495-RX, Juli 1967
  
- [17] Butzek, D.; Schmidt, F.:  
Vortrag: ITR-Austauschgreium, Heidelberg 22.4.1971  
ITR-Brennstoff-Moderator-Gemisch-Bestrahlung (LV 30.4):  
Aufbau der Bestrahlungseinrichtung und Ablauf des Be-  
strahlungsexperiments.
  
- [18] Euringer, H.; Hürttlen, B.:  
Bestrahlungsbericht-Bestrahlungsexperiment JPV1  
KFA-IRW-IB-22/70, Dezember 1970
  
- [19] Euringer, H.; Hürttlen, B.:  
Bestrahlungsbericht-Bestrahlungsexperiment FRJ-2 - P9  
(JP9)  
KFA-IRW-IB-10/70, August 1970
  
- [20] Thöne, L.; Schmidt, F. (ZIR):  
Abschlußbericht-Bestrahlungsexperiment MOPS B05  
KFA-IRW-IB-9/71, März 1971
  
- [21] Müller, H.:  
Bestrahlungsbericht MOPS B07  
KFA-IRW-IB-39/71, November 1971
  
- [22] Stechemesser, H.:  
Entwurf und Bau eines Spülkreislaufes zum Spalt-  
produkttransport  
Kerntechnik 10 (1968) Nr. 6, S. 325-330
  
- [23] Stechemesser, H.; Bachner, E.; Bertram, W.; Euringer, H.;  
u.a.: Spülkreissysteme für HTR-Bestrahlungsexperimente-  
Auslegung und Spaltgasmessungen  
Vortrag H7-512, Reaktortagung 1971

## 6. Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1 Bestrahlungseinrichtung am FRJ-2 (Dido)
- " 2 Kreislaufschema für FRJ-2-Anlage
  - " 3 2"-Baukastensystem
  - " 4 2"-Baumusterplan
  - " 5 2"-Einkapselausführung 1 u. 3
  - " 6 2"-Vierkapselausführung 2
  - " 7 2"-Vierkapselmusterrig Ausf. 2
  - " 8 2"-Brennstabausführung 4
  - " 9 Temperaturverteilung f. Ausf. 1 u. 2
  - " 10 Temperaturverteilung f. Ausf. 3
  - " 11 2"-Anschlußkopf-Vierkapselausführung
  - " 12 2"-Bestrahlungskapsel Ausf. 2
  - " 13 1 1/2"-Bestrahlungskapsel (Niob)
  - " 14 Spaltproduktfilter (f. Brennstoffröhrs)
  - " 15 Bestrahlungs-Diagramm



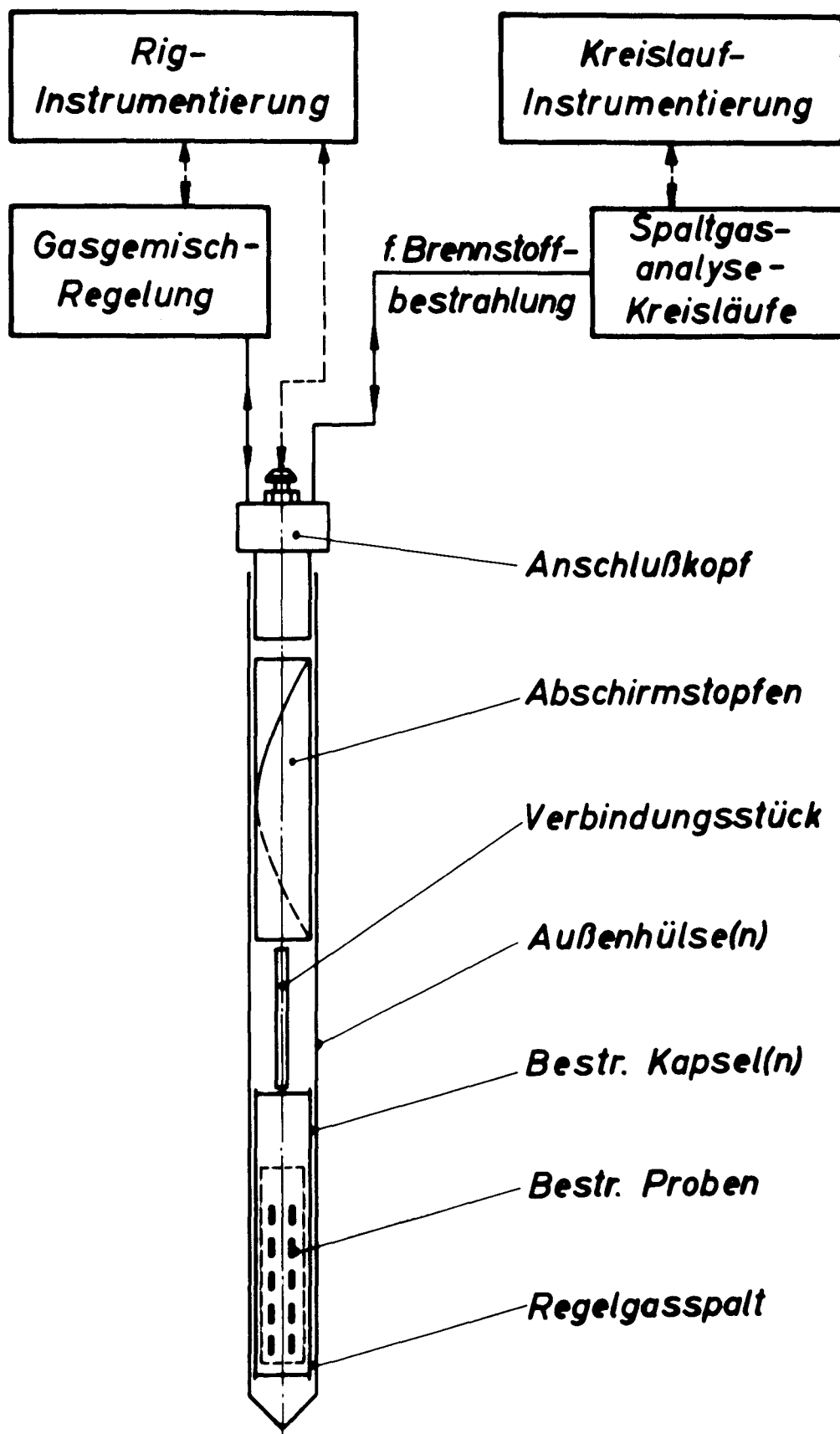
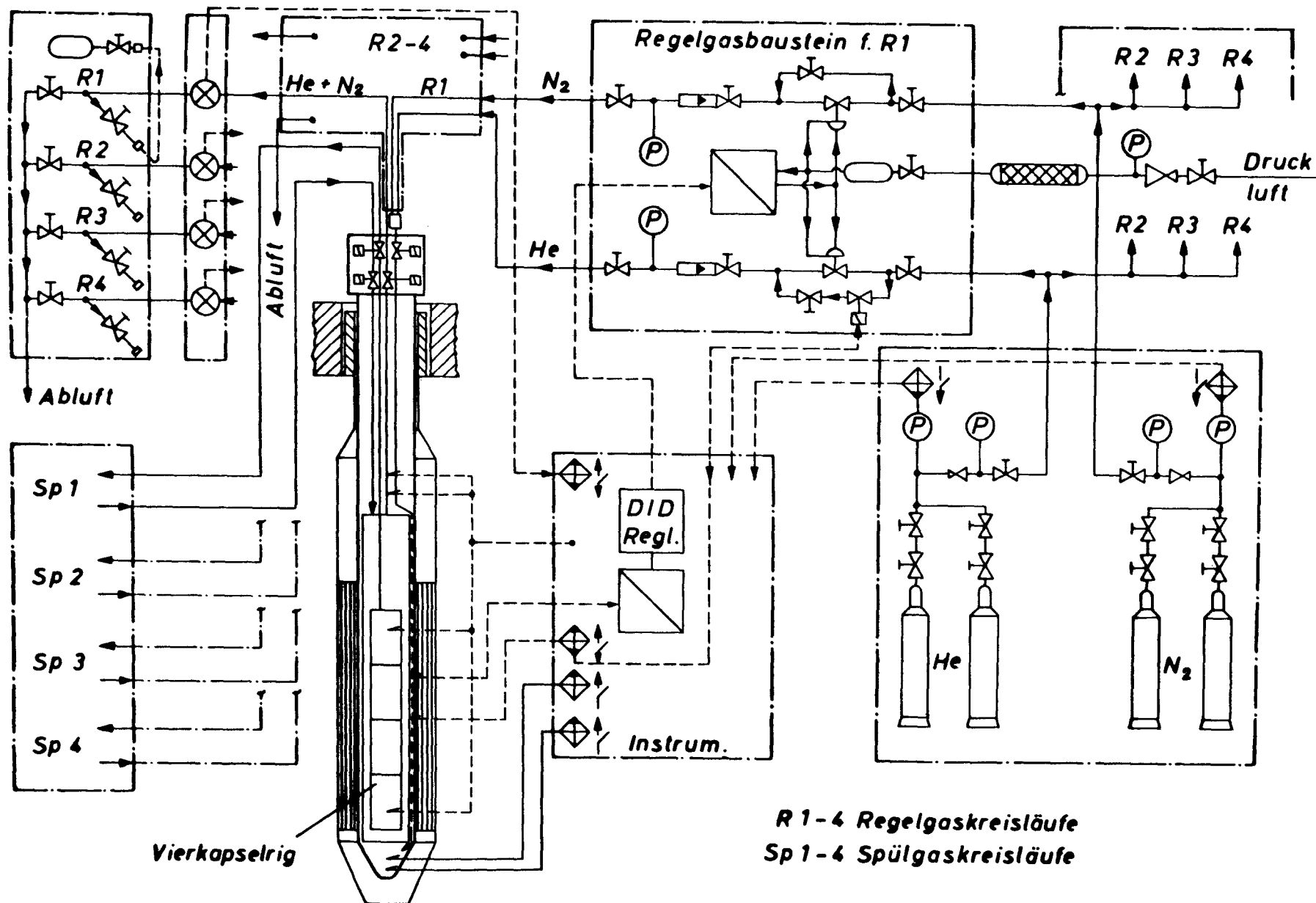


Abb.1 Bestrahlungseinrichtung am FRJ-2 (Dido)



Abb. 2 Kreislaufschema f. FRJ-2 Anlage





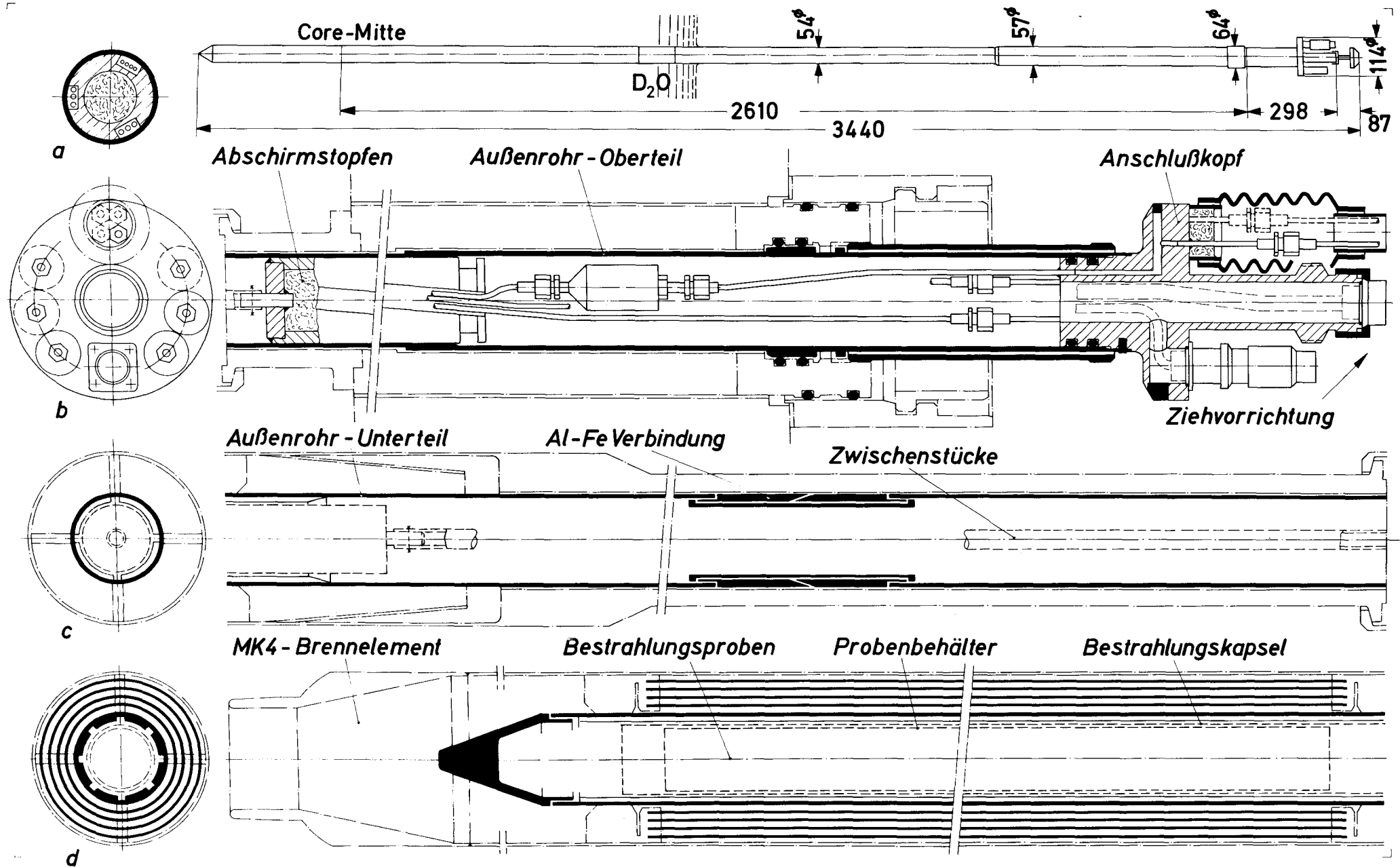


Abb. 3 2"- Bestrahlungseinsatz - Baukastensystem LV30





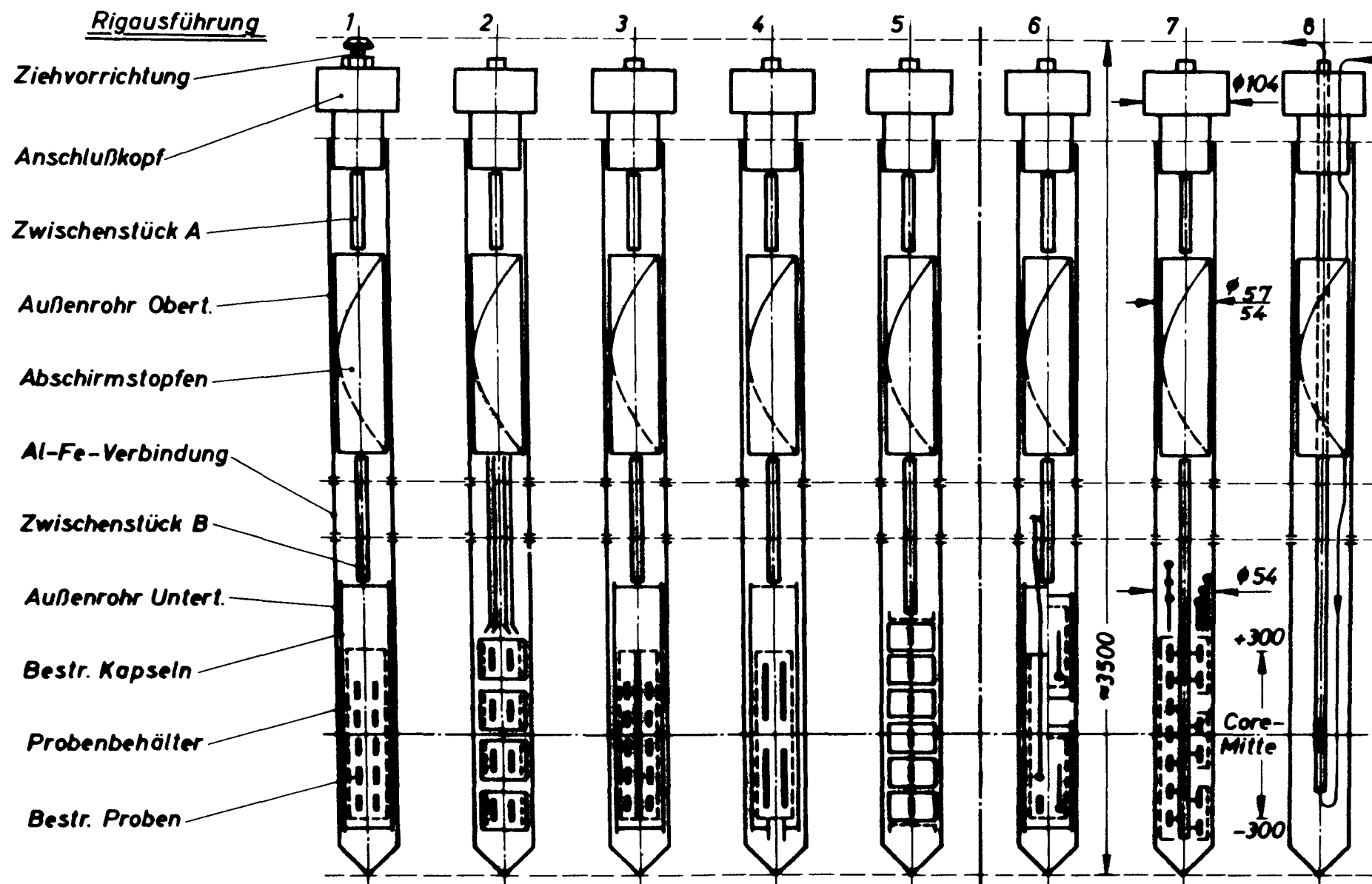


Abb.4. Baumusterplan f. LV 30



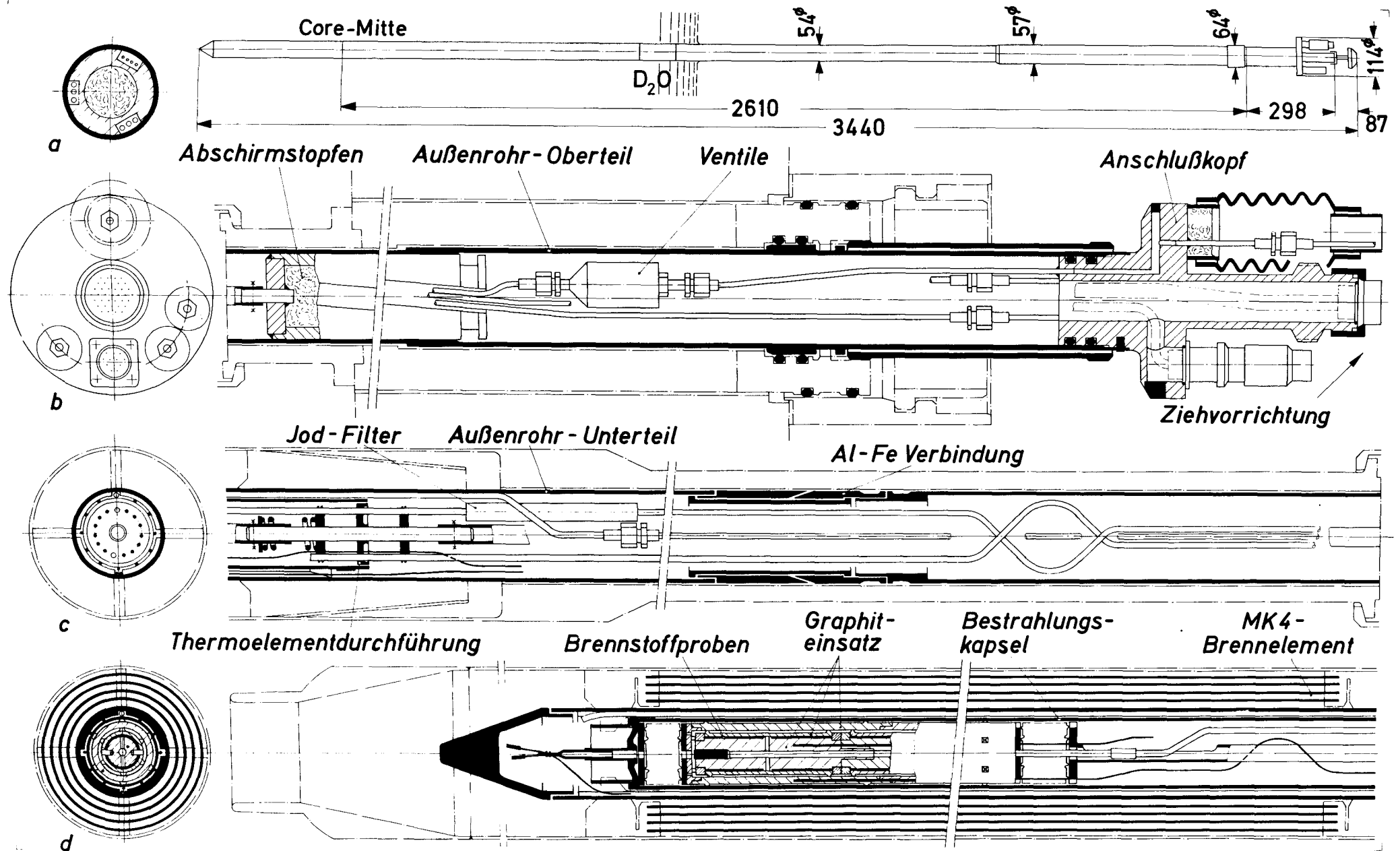


Abb. 5 2'' - Bestrahlungseinsatz - Einkapselausführung LV30.1 u. 3



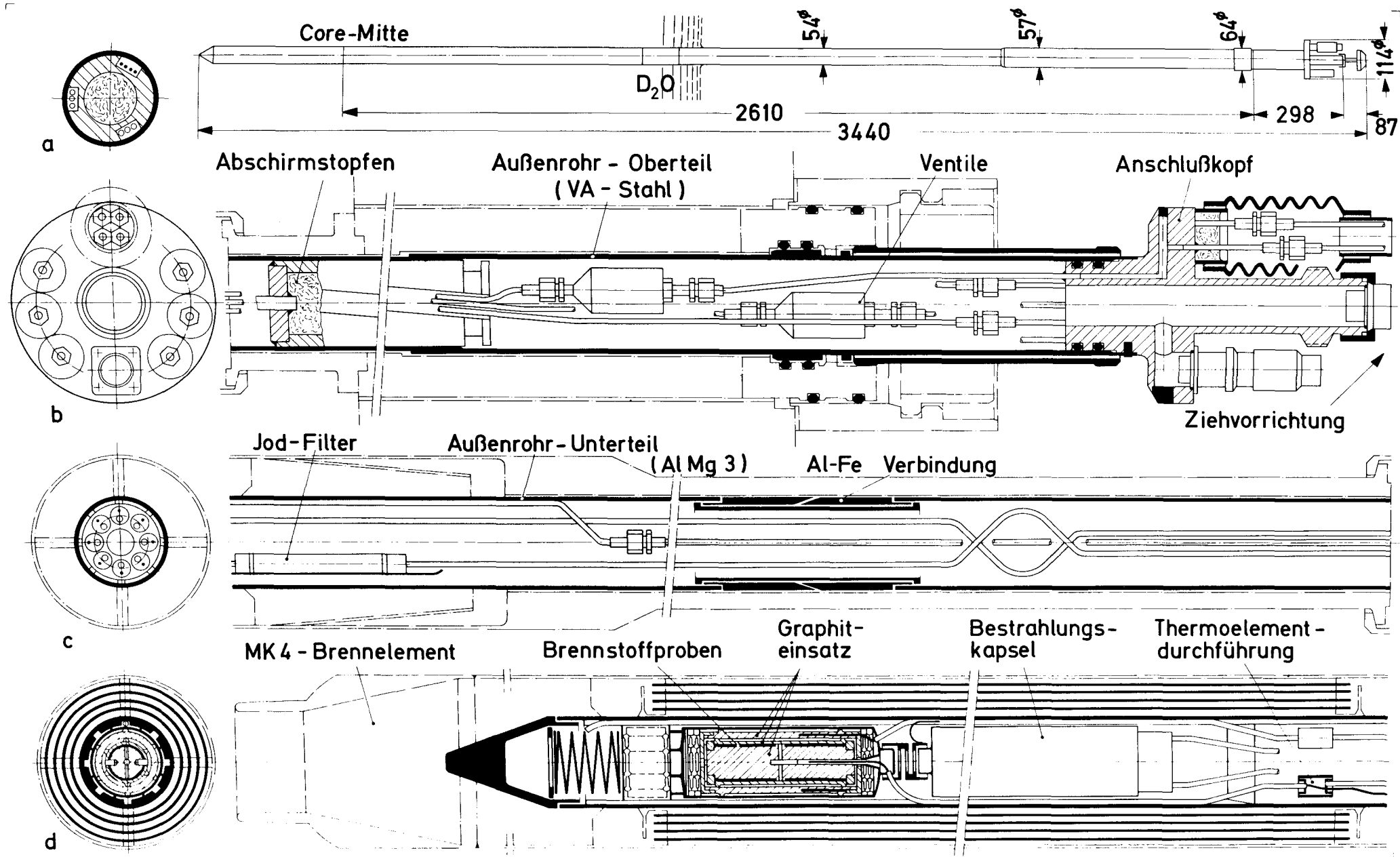


Abb. 6. 2" - Bestrahlungseinsatz - Vierkapselausführung LV30.2





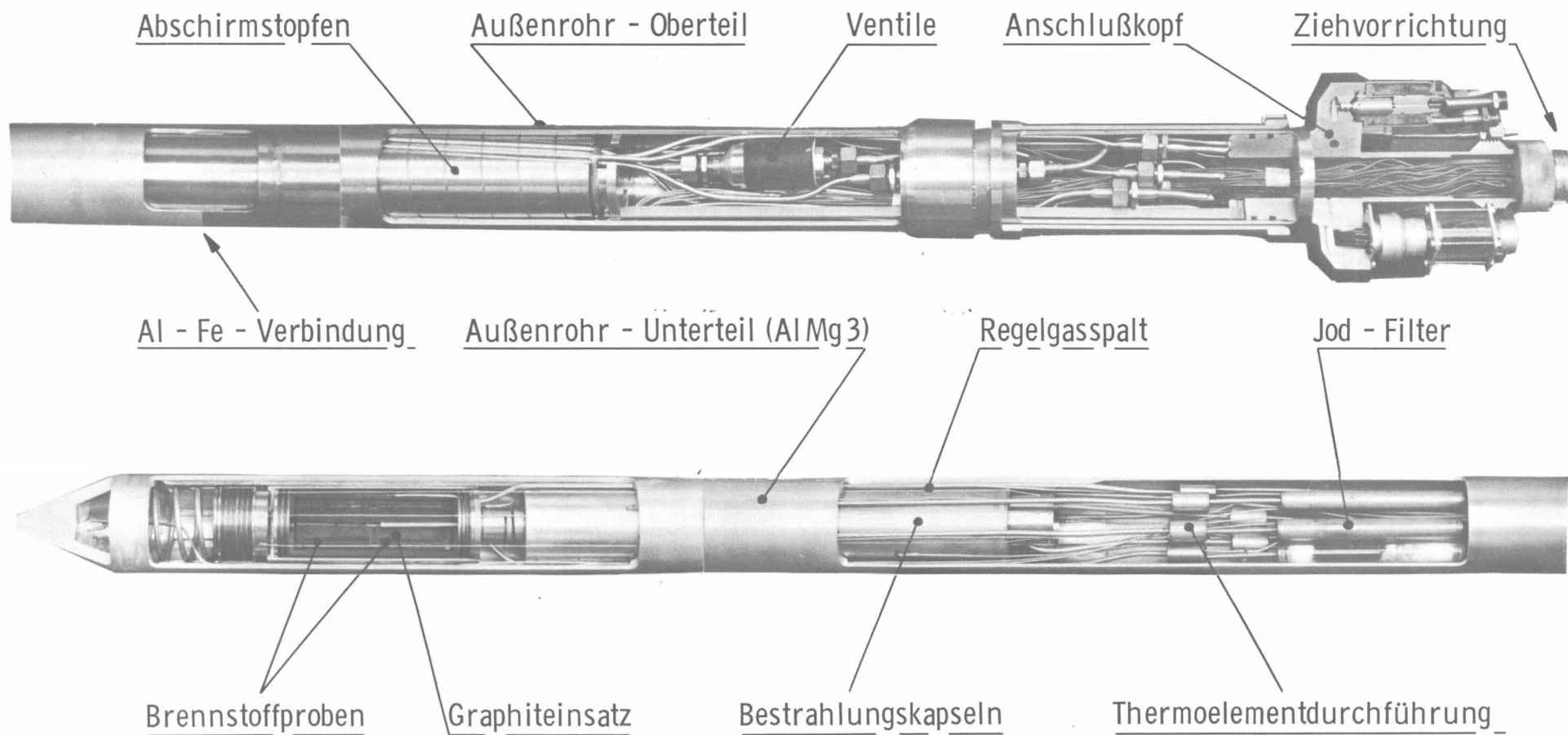


Abb. 7 Aufgeschnittener 2"- Bestrahlungseinschub  
für die Bestrahlung von beschichteten Brennstoff - Teilchen in vier Kapseln



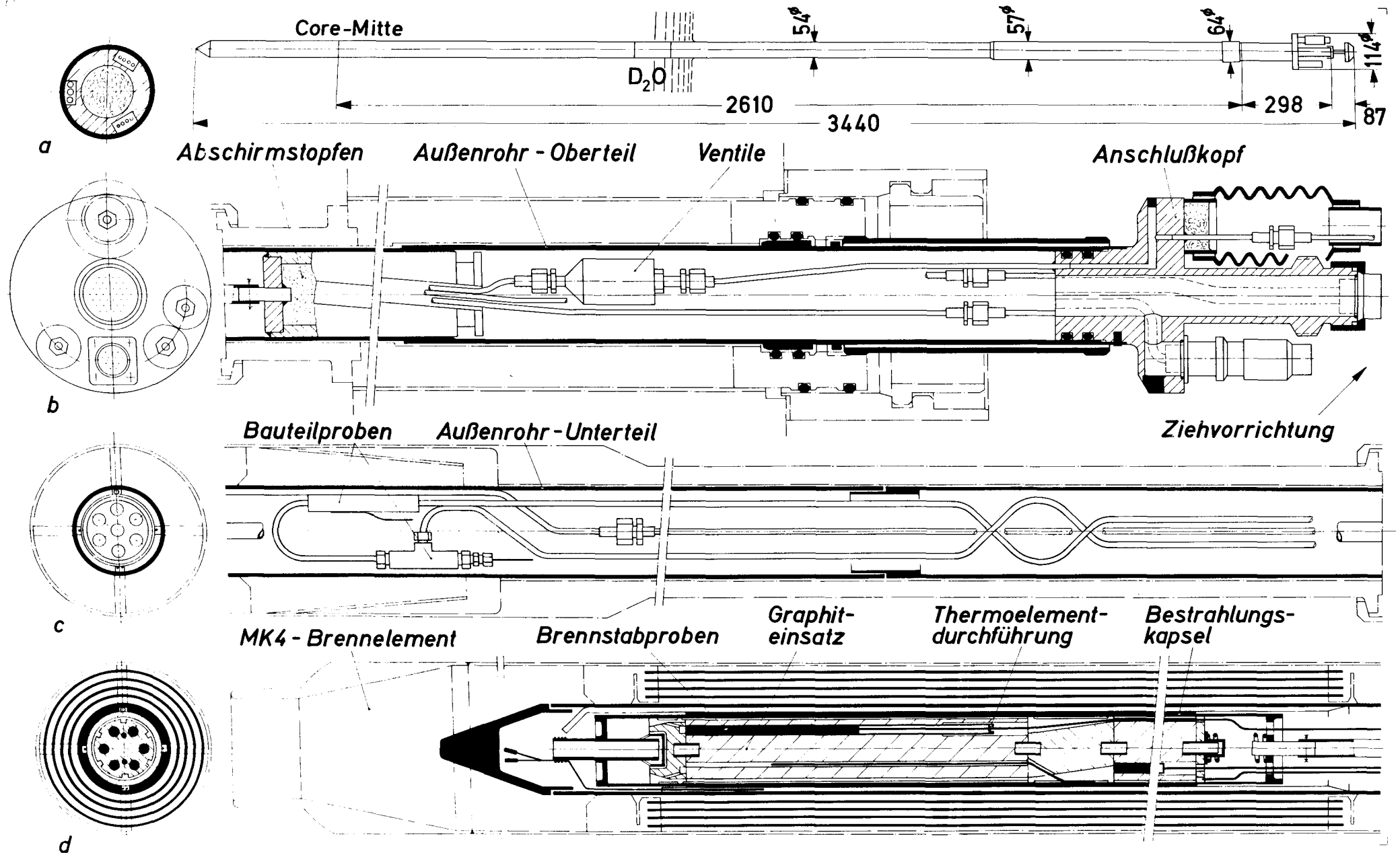


Abb. 8 2"- Bestrahlungseinsatz - Brennstabausführung LV30.4



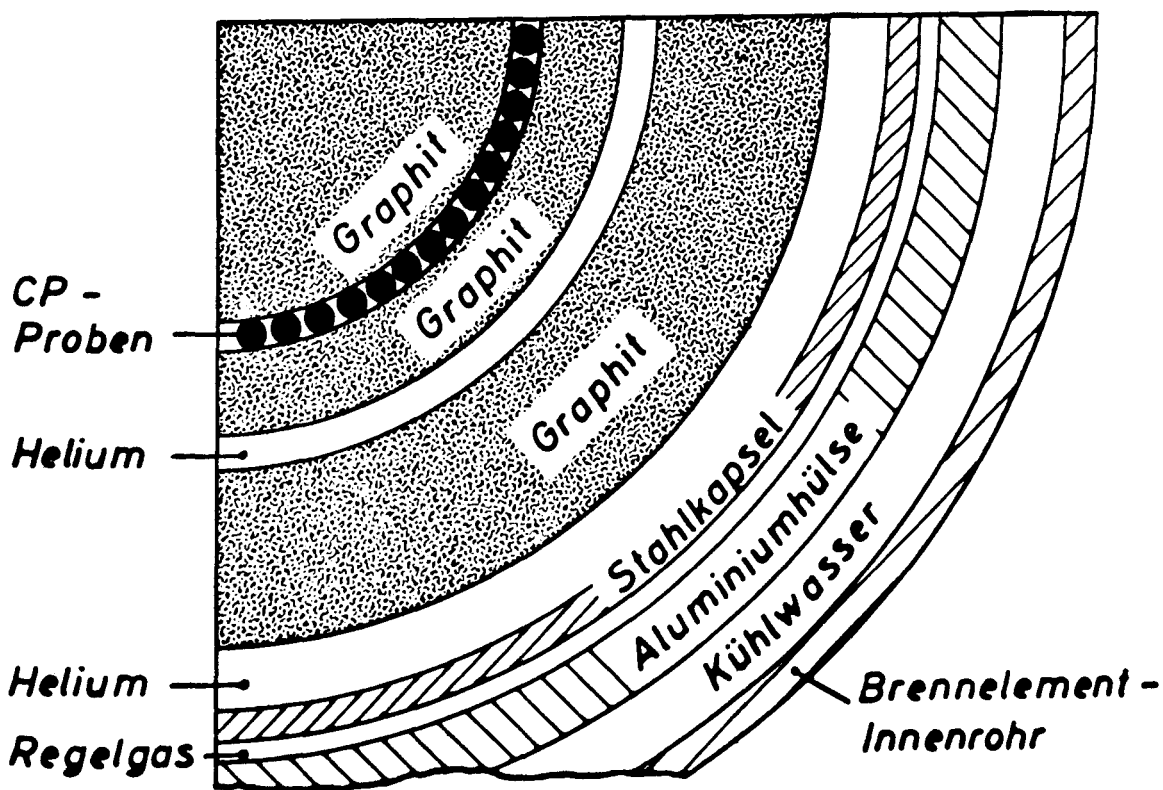
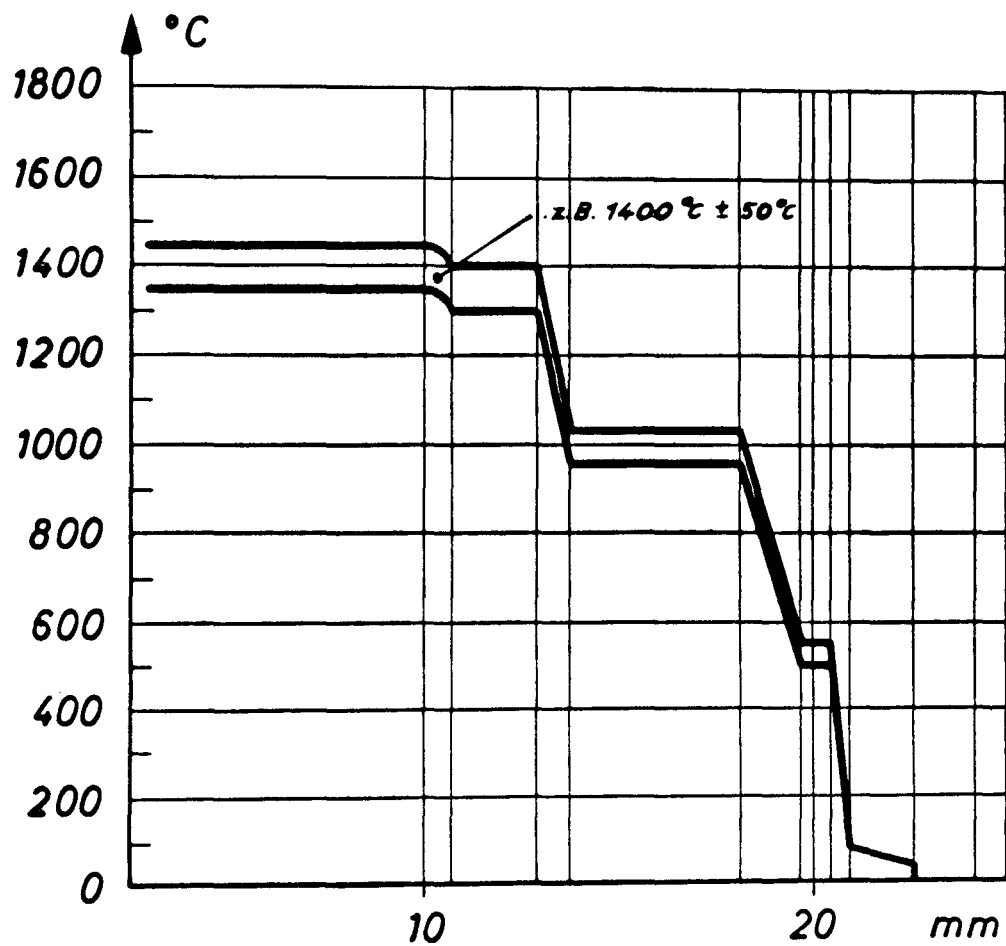


Abb. 9 Temperaturverteilung f. Rigausführung 2



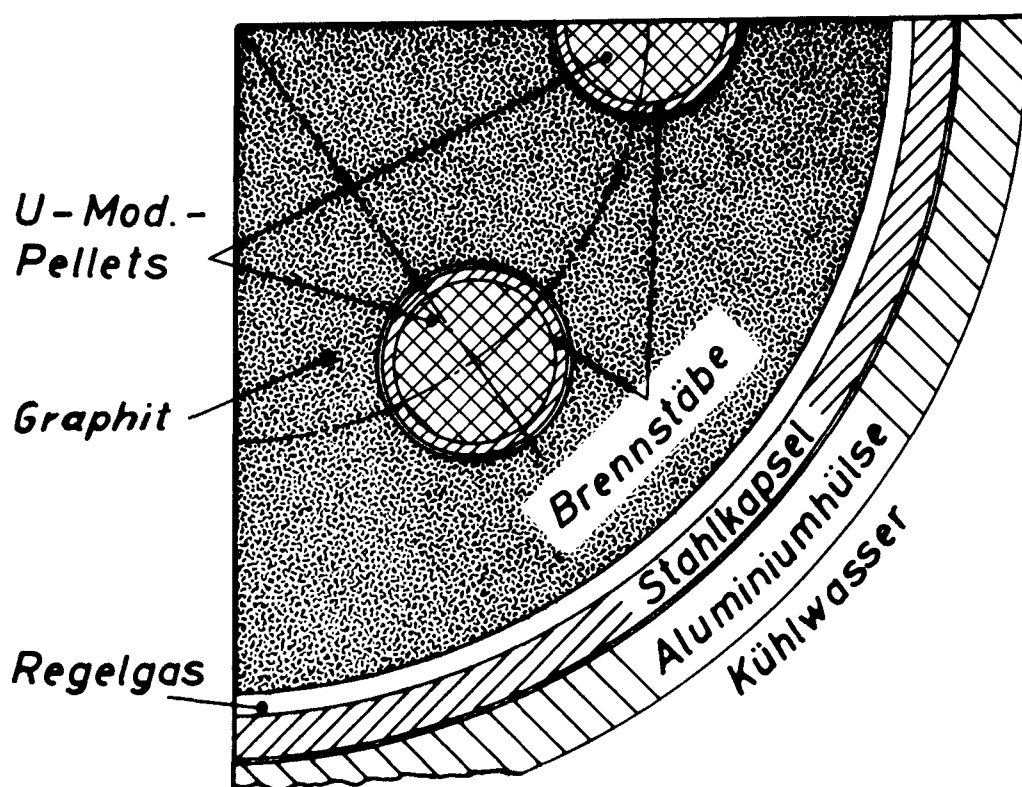
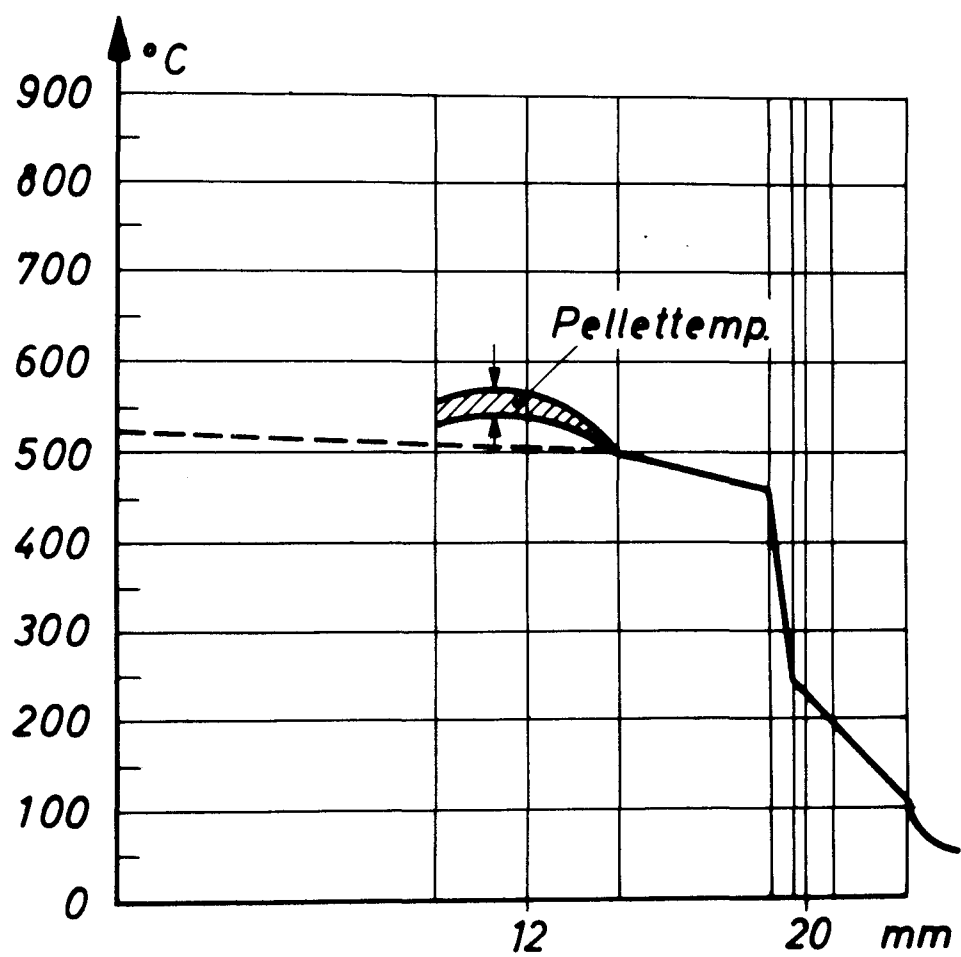


Abb. 10 Temperaturverteilung f. Rigausführung 4





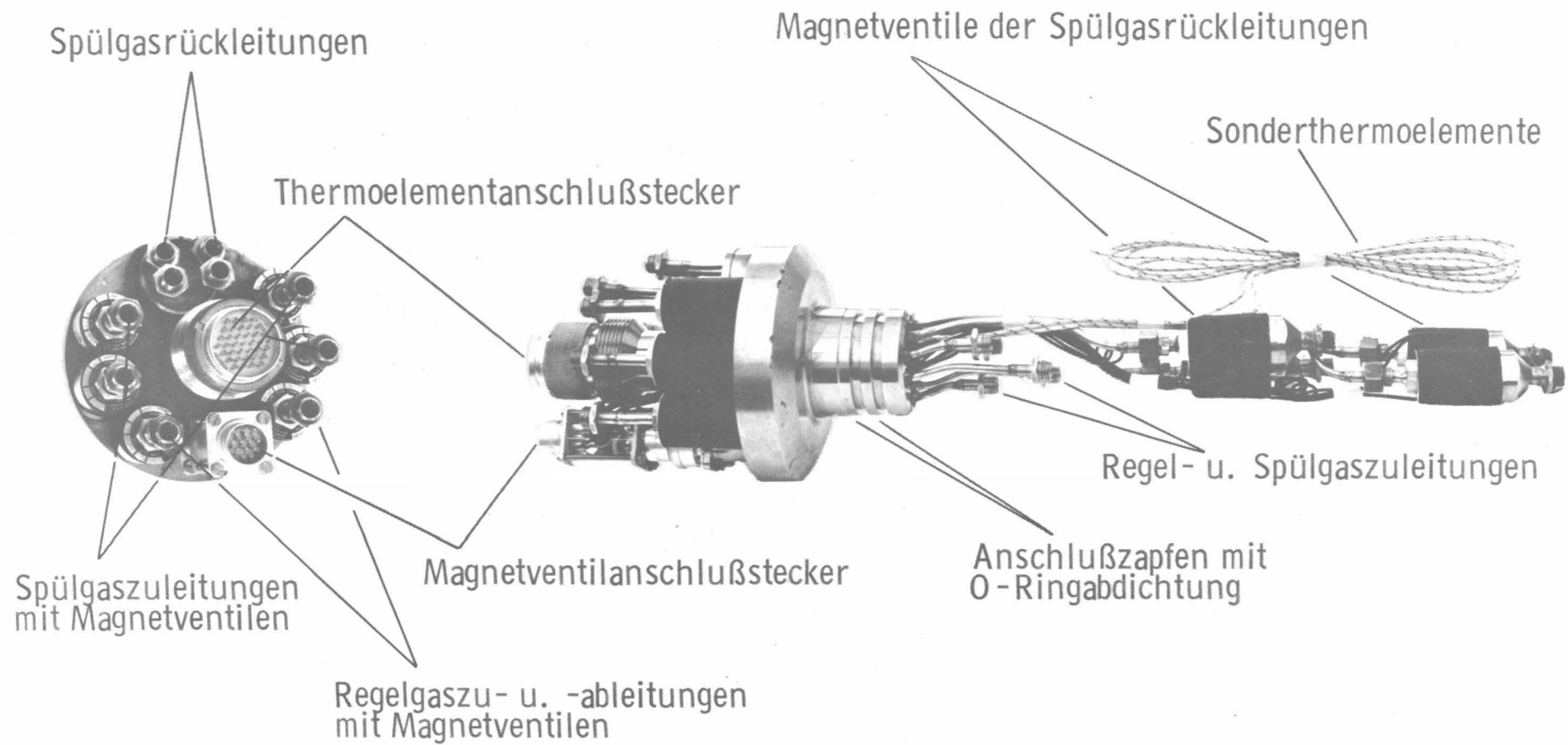


Abb. 11: 2"-Anschlußkopf - Vierkapselausführung



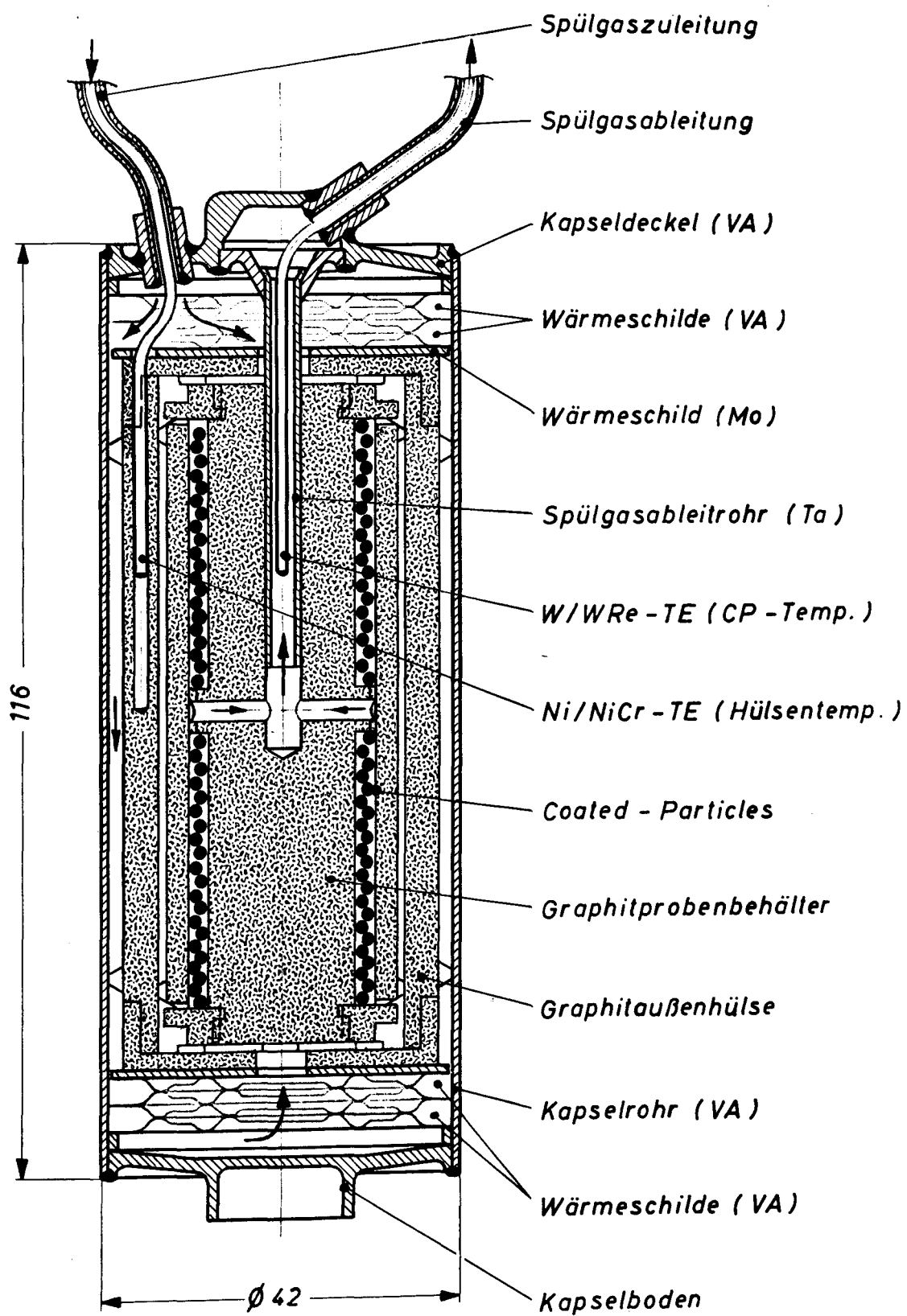


Abb. 12 Bestrahlungskapsel f. Rigaausführung 2



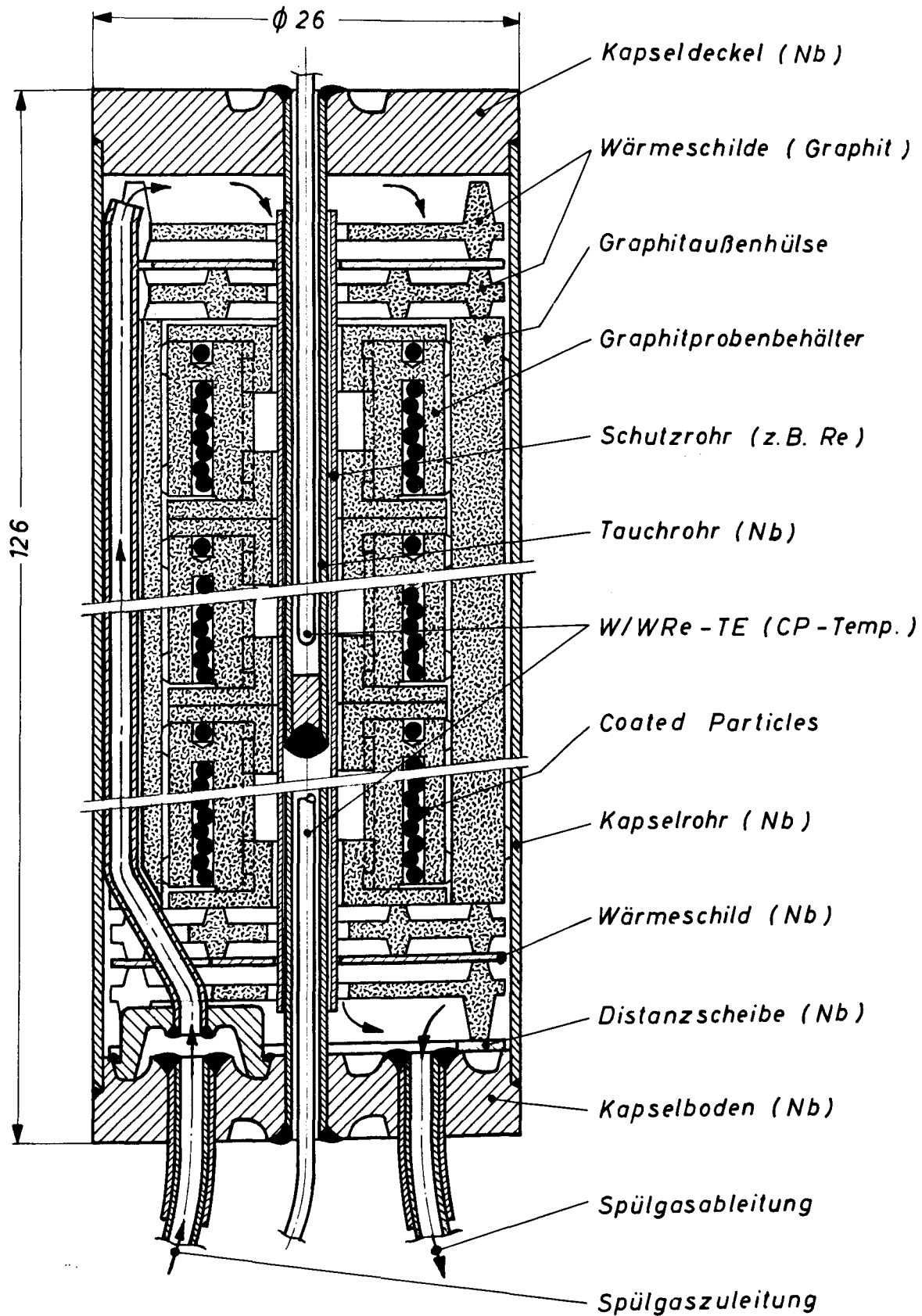
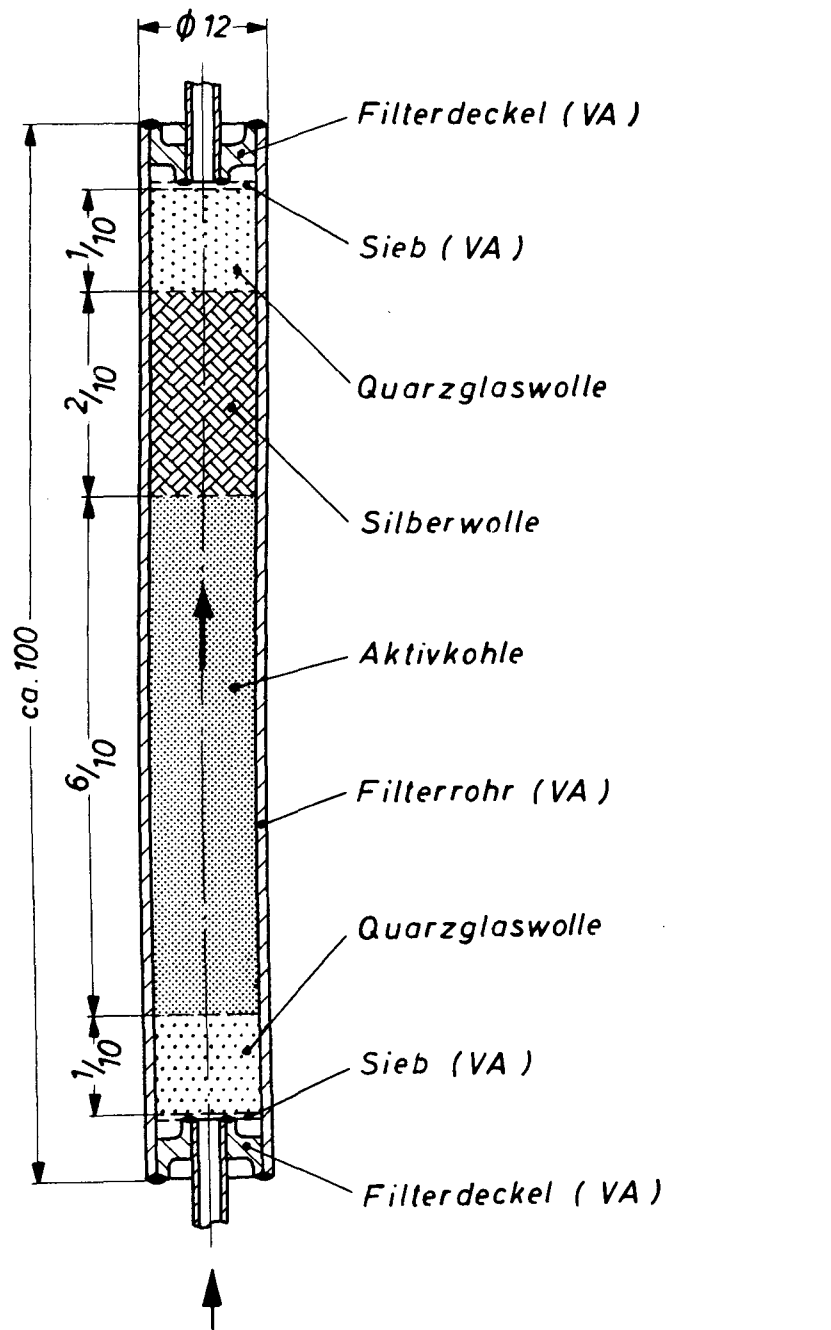


Abb. 13 Bestrahlungskapsel f. 1 1/2" Rigaführung Mol





*max. Betriebstemp. ca 350°C*

*Abb. 14 Spaltproduktfilter*





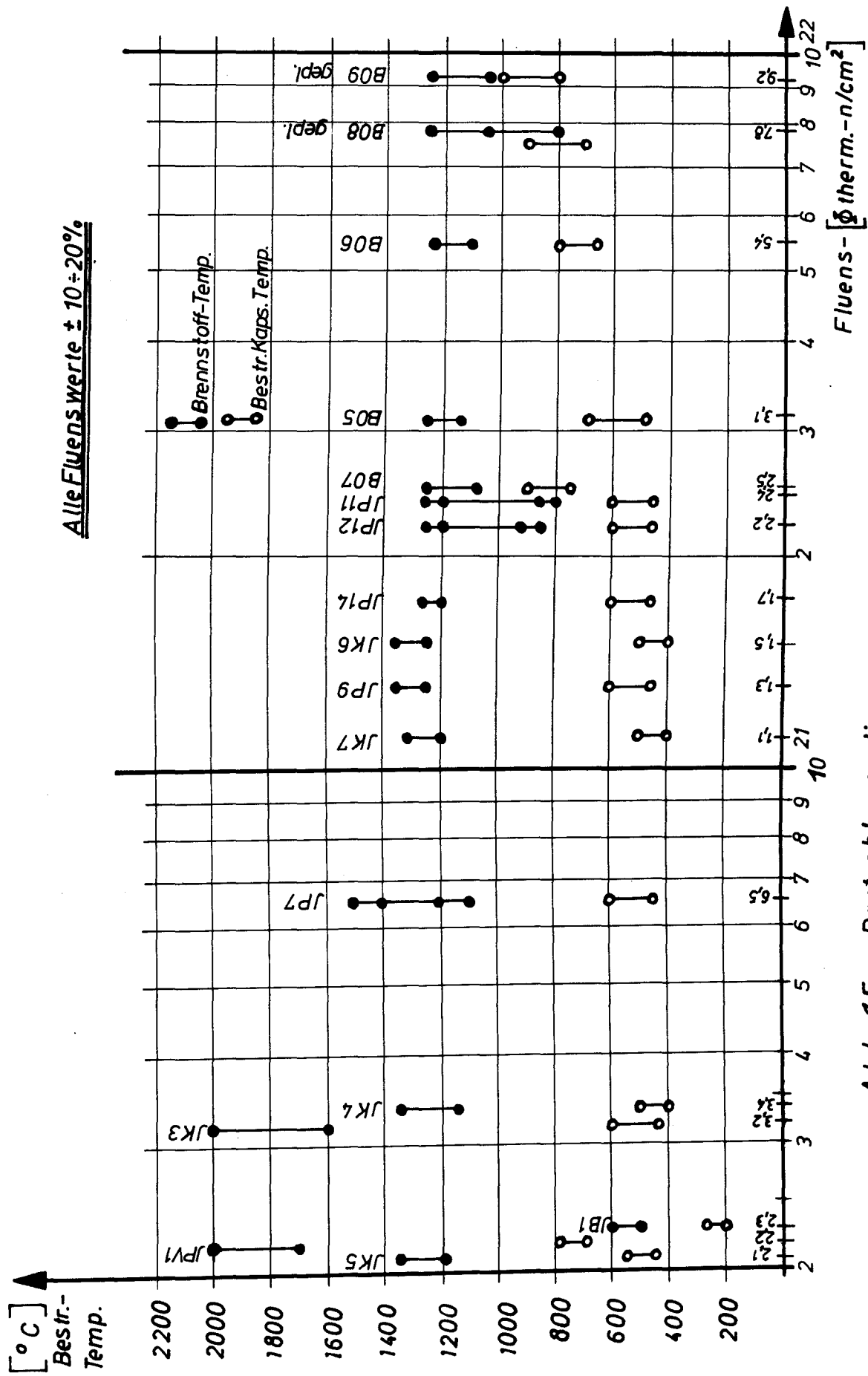


Abb.15 Bestrahlungsdiagramm